

Hanna Isosalo

# **ANHYDRIDIKOVETTEISET EPOKSIT SÄHKÖMOOTTOREIDEN VALMISTUKSESSA**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Johanna Ruoranen  
Lokakuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Hanna Isosalo: Anhydridikovetteiset epokset sähkömoottoreiden valmistuksessa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Materiaalitekniikka  
Lokakuu 2020

---

Suurjänniteinduktiomoottoreita käytetään esimerkiksi prosessi- ja kaivosteollisuudessa. Yksi induktiomoottoreiden valmistamisessa käytettävistä materiaaleista on epoksi, jonka kovettamiseen on käytetty anhydridikovetetta. Anhydridikovetteisia epokseja käytetään suurjänniteinduktiomoottoreissa staattorin käämityksessä sähköisenä eristeenä. Sähköisen eristävyuden lisäksi epoksi jäykistää käämityksen rakennetta, johtaa lämpöä pois käämityksestä sekä suojaa käämitystä ja staattoria ympäristöltä. Tässä työssä tutkitaan anhydridikovetteisten epoksien roolia sähkömoottoreiden valmistuksessa. Työn tavoite on selvittää, miksi anhydridikovetteisia epokseja käytetään suurjänniteinduktiomoottoreiden valmistuksessa ja mitä vaihtoehtoja niille on olemassa.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuustutkimusosa on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen käsittelee epoksisysteemejä ja toinen epoksien roolia sähkömoottoreiden valmistuksessa. Epokseja tarkastellaan materiaalityypinä ja esitellään epoksisysteemien tyypilliset komponentit. Lisäksi esitellään tyypillisin induktiomoottoreissa käytettävä epoksisysteemi komponenteittain. Toisessa osassa esitellään induktiomoottoreiden rakenne ja epoksin rooli staattorin eristysmateriaalina. Tämän lisäksi tarkastellaan tyhjiökyllästysmenetelmää, joka on epoksin valmistamisen ja kovettamisen kannalta oleellisin työvaihe induktiomoottoreiden valmistuksessa. Kirjallisuuskatsauksen lopuksi tutkittiin anhydridikovetteisten epoksien vaihtoehtoja.

Epoksit ovat kertamuoveja, jotka koostuvat yleensä useammasta komponentista. Epoksihartsi kovetetaan kertamuoviksi usein yhden tai useamman kovetteen avulla. Induktiomoottoreissa yleisimmin käytettävä epoksisysteemi koostuu epoksihartsista (DGEBA) sekä anhydridikovetteesta (MHHPA). Epoksiin valitut komponentit sekä mahdollinen lämpökäsittely määräävät kovetetun kertamuovin mikrorakenteen ja lopulliset ominaisuudet. Anhydridikovetteita käytetään, koska muut saatavilla olevat ristikuituskovetteet eivät pysty tuottamaan kaikkia epoksilta vaadittuja ominaisuuksia induktiomoottoreiden valmistuksessa.

Anhydridikovetteiden käyttöä tullaan tulevaisuudessa rajoittamaan Euroopan Unionin alueella niiden terveysriskien vuoksi. Tämän johdosta anhydridikovetteita valmistavien ja käyttävien yritysten tulee etsiä vaihtoehtoisia kovetteita tai eristysysteemejä. Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin, että tutkimusta korvaavista vaihtoehdoista on tehty vasta vähän. Toistaiseksi kirjallisuudessa esitelty vaihtoehdot perustuvat joko anhydridikovetteen korvaamiseen toisella ristikuituskovetteella tai katalysoituun epoksihartsin homopolymerisaatioon. Uusien epoksisysteemien kaupallistaminen vaatii lisää tutkimusta, etenkin uuden epoksisysteemin käyttäytymisestä osana sähkömoottorin käämityksen eristysysteemiä.

Avainsanat: epoksihartsi, epoksi, anhydridikovete, sähkömoottori, induktiomoottori, staattori, käämitys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty materiaalitekniikan tutkinto-ohjelmassa osana tekniikan kandidaatin tutkintoa. Aihe valikoitui monien kiinnostavien joukosta ja osoittautui käytännössä haastavaksi. Tästä huolimatta, tai ehkä juuri tämän takia, projekti on ollut erittäin palkitseva.

Haluan kiittää kandidaatintyön ohjaajaa Johanna Ruorasta työlle omistetusta ajasta, kehitysehdotuksista sekä tuesta koko projektin ajan. Kiitos perheelle kaikesta tuesta opiskeluvuosien aikana. Kiitos ystäville erityisesti kirjastossa ja skellarissa vietetyistä ajoista.

Espoossa, 13.10.2020

Hanna Isosalo

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn tausta.....	1
1.2 Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset.....	1
2. EPOKSISYSTEEMIT .....	3
2.1 Hartsit materiaalityhmänä .....	3
2.2 Epoksit.....	4
2.2.1 Epoksit materiaalityhmänä.....	5
2.2.2 Epoksihartsit .....	6
2.2.3 Kovetteet .....	7
2.2.4 Lisäaineet .....	10
2.3 Sähkömoottoreissa käytettävä epoksisysteemi.....	11
2.3.1 Epoksihartsit DGEBA.....	12
2.3.2 DGEBA:n kovetteena käytettävä MHPA .....	13
3. EPOKSIT SÄHKÖMOOTTOREIDEN VALMISTUKSESSA .....	17
3.1 Kolmivaiheisen induktio-moottorin perusrakenne .....	17
3.2 Induktio-moottoreiden staattorien eristysysteemi.....	20
3.3 Epoksi induktio-moottoreiden eristysmateriaalina .....	23
3.4 Tyhjiökyllästysmenetelmä .....	25
3.5 Anhydridikovetteiden epoksien vaihtoehdot sähkömoottoreiden valmistuksessa .....	27
4. YHTEENVETO.....	32

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

Cl	Kloori
DGEBA	Bisfenoli A:n diglysidyylietteri
DY	tarkemmin määrittelemätön, polymerisaatiota helpottava katalyytti
ECHA	European Chemicals Agency, Euroopan kemikaalivirasto
EP	tarkemmin määrittelemätön, polymerisaatiota helpottava katalyytti
EU	Euroopan Unioni
HCl	vetykloridi, suolahappo
LME 11096-1	tarkemmin määrittelemätön, useasta erilaisesta monomeerista koostuva testiharts
LME 11173	tarkemmin määrittelemätön, useasta erilaisesta monomeerista koostuva testiharts, joka ei sisällä DGEBA:ta
MA	tarkemmin määrittelemätön, homopolymerisaatiota helpottava katalyytti
MHHPA	Metyyliheksahydroftaalihappoanhydridi
NaOH	natriumhydroksidi
New 1	Huntsmanin & Isovoltan kehittämä epoksisysteemi 1
New 2	Huntsmanin & Isovoltan kehittämä epoksisysteemi 2
New 3	Huntsmanin & Isovoltan kehittämä epoksisysteemi 3
OH	Hydroksyyli ryhmä
VPI	Vacuum Pressure Impregnation, tyhjiökyllästysmenetelmä

# 1. JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan anhydridikovetteisten epoksien käyttöä sähkömoottoreiden valmistuksessa. Epokset ovat kaupallisesti yksi merkittävimmistä kertamuoveista ja niitä käytetään sähkömoottoreiden lisäksi useissa erilaisissa sovelluskohteissa. Myös sähkömoottoreita käytetään hyvin laajasti, esimerkiksi prosessi- ja meriteollisuudessa, logistiikassa sekä kaivosteollisuudessa.

## 1.1 Työn tausta

Sähkömoottoreissa käytetyt epokset valittiin opinnäytteen aiheeksi oman mielenkiinnon ja epoksien monipuolisten käyttökohteiden johdosta. Sekä epoksien että sähkömoottoreiden valmistuksella ja käytöllä on pitkä historia, joten tietoa aiheista on runsaasti saatavilla. Aiheeseen liittyy niin materiaalin valintaan, valmistustekniikkaan kuin tuotekehitykseenkin liittyviä näkökulmia. Käsiteltävän epoksin komponentit ovat erittäin yleisiä muissakin sovelluskohteissa. Yhden sovelluskohteen esittely auttaa hahmottamaan epoksien käyttöä myös yleisemmällä tasolla.

Vaikka epokseja on käytetty menestyksekkäästi kymmeniä vuosia, jatkuvasti lisääntyvä tieto ja uudet sovelluskohteet nostavat keskusteluun uusia epoksien käyttöön liittyviä näkökulmia. Pitkäaikainen teollisuuskäyttö on lisännyt tietoa epoksien käyttöön liittyvistä terveysriskeistä niiden parissa työskenteleville työntekijöille. Terveysriskeihin liittyvän tiedon lisääntyminen on saanut niin epokseja käyttävät yritykset kuin alalla toimivat järjestöt ja lainsäätäjät kiinnittämään enemmän huomiota työturvallisuuteen. Työntekijöiden turvallisuuden varmistaminen sekä tiukentuva lainsäädäntö yhdessä luovat yrityksille tarpeen etsiä vaihtoehtoisia materiaaleja ja valmistusmenetelmiä.

## 1.2 Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset

Tämän opinnäytteen tavoitteena on tutkia anhydridikovetteisten epoksien roolia sähkömoottoreiden valmistuksessa. Opinnäytetyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Työssä pyritään löytämään vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miksi anhydridikovetteisia epoksihartseja käytetään sähkömoottoreiden valmistuksessa
- Mitä vaihtoehtoja on anhydridikovetteisille epoksille

Tutkimuskysymyksiä lähestytään tutkimalla ensin hartseja ja epokseja materiaalityyppinä, tutustuen niiden ominaisuuksiin, tyypillisiin käyttökohteisiin ja valmistukseen. Tämän jälkeen sähkömoottorit esitellään yleisellä tasolla, jotta voidaan tarkemmin tutustua epoksin rooliin sähkömoottoreiden valmistuksessa. Sähkömoottoreiden valmistusprosessista esitellään epoksin kannalta oleellinen tyhjiökyllästysmenetelmä, joka on yksi sähkömoottoreiden valmistuksen osaprosesseista. Toista tutkimuskysymystä tutkitaan etenkin sähkömoottoreiden vaatimien ominaisuuksien näkökulmasta.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan ainoastaan sähkömoottoreiden valmistuksessa oleellisinta epoksisysteemiä. Tarkastelu rajataan lisäksi koskemaan ainoastaan kolmivaiheisia suurjänniteinduktiomoottoreita, joissa epoksisysteemiä pääasiassa käytetään. Suurjänniteinduktiomoottoreiden valmistuksessa käytetyn epoksisysteemin keskeisimmät komponentit ovat bisfenoli A:n diglysidyylietteri (DGEBA), joka on epoksihartsi, sekä kovetusaineena käytetty metyyliheksahydroftaaliyhäpoanhidridi (MHHPA). Lisäksi sovelluskohteesta riippuen epoksisysteemissä voidaan käyttää erilaisia lisäaineita. Sekä DGEBA että MHHPA ovat kaupallisesti merkittävimpiä epoksien komponentteja kaikki sovelluskohteet huomioiden, joten tarkastelun rajaaminen niihin on mielekäästä myös niiden yleisyyden vuoksi.

## 2. EPOKSISYSTEEMIT

Kirjallisuusosio on jaettu alalukuihin tutkimuskysymyksen tarkastelun helpottamiseksi. Alaluvussa 2.1 käsitellään yleisesti hartseja materiaaliryhmänä sekä niiden ominaisuuksia että käyttökohteita. Hartsien tarkastelu auttaa ymmärtämään paremmin niiden roolia kertamuovien valmistuksessa. Alaluku 2.2 tarkastelee epokseja materiaaliryhmänä. Tässä alaluvussa esitellään epoksien tyypillisimmät komponentit. Epokset ovat kertamuoveja, joiden koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat käytettyjen komponenttien mukaan. Alaluvussa 2.3 käsitellään tarkemmin sähkömoottoreiden valmistuksessa käytettävää epoksisysteemiä, jonka tärkeimmät komponentit ovat DGEBA ja MHHPA. Epoksisysteemissä käytettävät hartsi ja kovete esitellään yksityiskohtaisesti.

### 2.1 Hartsit materiaaliryhmänä

Hartsit ovat amorfisia makromolekyyllisiä materiaaleja, joiden olomuoto voi vaihdella kiinteästä nestemäiseen [1, s. 27]. Hartsilla voidaan viitata joko monen kemiallisen yhdisteen seokseen tai kertamuovin nestemäiseen puolivalmisteseeseen tai esipolymeeriin [2] asiayhteydestä riippuen. Puhekielessä hartsilla tarkoitetaan usein kovetettua kertamuovia, joka on nestemäisen hartsin, kovetteen sekä erilaisten lisäaineiden seos. Hartseihin kuuluu suuri määrä orgaanisia aineita, joilla voi olla hyvinkin erilaiset kemialliset koostumukset, mutta samankaltaiset fysikaaliset ominaisuudet. Hartsien moolimassa vaihtelee, mutta on usein alle 10 000 g/mol. Hartsit ovat amorfisia aineita, joten sulamispisteen sijaan niillä on lasisiirtymälämpötila. Ne eivät yleensä liukene veteen. [3, s. 1-2] Hartsit voivat esiintyä sekä kiinteässä että nestemäisessä olomuodossa. Nestemäisillä hartseilla on yleensä matala viskositeetti.

Hartsit luokitellaan alkuperän mukaan luonnollisiin ja synteettisiin hartseihin. Luonnolliset hartsit ovat peräisin joko kasveista tai eliöistä. Esimerkkejä luonnollisista hartseista ovat tiettyjen havupuiden erittämät pihkat, fossiilinen meripihka sekä tiettyjen hyönteisten erittämä sellakka. Synteettiset hartsit valmistetaan kontrolloiduilla kemiallisilla reaktioilla lähtöaineista, joilla ei sellaisenaan ole hartseille tyypillisiä ominaisuuksia. Tyypillisiä reaktiomekanismeja ovat polyadditio ja polykondensatio. Synteettiset hartsit voidaan edelleen jakaa hiilivetyhartseihin ja muihin synteettisiin hartseihin, jotka toimivat välituotteina erilaisille muoveille. Kertamuovien valmistuksessa käytettäviä hartseja ovat esimerkiksi erilaiset epoksi-, amino- ja vinyylhartsit. [1, s. 7, 17, 32] [3, s. 2] Hartseja



luokitellaan tyypillisesti niiden sisältämien funktionaalisten ryhmien perusteella. Koska funktionaalisia ryhmiä voi olla useita erilaisia, luokittelu ei ole yksikäsitteinen.

Synteettisistä hartseista valmistettujen kertamuovien ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa huomattavasti lähtöaineilla ja valitulla valmistusmenetelmällä. Kovetusprosessissa nestemäinen hartsi muodostaa kolmiulotteisen ristosilloitetun rakenteen. Kertamuovin mekaaniset ominaisuudet riippuvat hartsin molekyylirakenteesta, lisäaineista sekä siitä, minkälainen ristosilloitettu rakenne kertamuoville muodostuu. Hartsin ja lisäaineiden molekyylirakenne riippuu valituista lähtöaineista, ja muodostuva ristosilloitus riippuu valitusta kovetusprosessista. Kovetusprosessi koostuu tyypillisesti erilaisista vaiheista, joilla on tarkasti määrätty kesto aika ja lämpötila. Kontrolloidulla kovetusprosessilla optimoidaan syntyvä verkottunut polymeerirakenne ja saavutetaan kulloinkin halutut ominaisuudet. [4, s. 330-332] Kovetetun kertamuovin ristosilloitustiheys määrää lopulliset ominaisuudet. Ristosilloitustiheyden kasvattaminen nostaa kertamuovin lujuutta, kovuutta ja lasisiirtymälämpötilaa. Se parantaa kertamuovin kemikaalin- ja lämmönkestävyyttä, mutta toisaalta se nostaa myös kertamuovin sisäisiä jännitteitä ja tekee materiaalista hauraampaa. Kasvanut ristosilloitustiheys vähentää lämpösokinkestävyyttä, väsymisominaisuuksia ja pienentää lämpölaajenemiskerrointa. [5, s. 199-200] Kovetusprosessissa käytettävä korkeampi lämpötila kasvattaa ristosilloitustiheyttä, joten kovetuslämpötilaa muuttamalla voidaan vaikuttaa syntyvään ristosilloitukseen ja sitä kautta kertamuovin lopullisiin ominaisuuksiin.

Synteettisistä hartseista valmistetuille kertamuoveille on runsaasti erilaisia käyttökohteita. Esimerkiksi fenoliryhmiä sisältävät hartsit ovat kemiallisesti inerttejä ja kestävät erityisen hyvin korkeita lämpötiloja, joten ne soveltuvat käytettäväksi erilaisissa rakenteissa sekä ilmailu- ja avaruusteollisuudessa. Aminoryhmiä sisältäviä hartseja puolestaan käytetään erilaisissa liimoissa ja lakoissa. Epoksiryhmiä sisältävät hartsit, eli epoksihartsit, ovat erittäin monikäyttöisiä, ja kovetettuina niitä käytetään pinnoitteina, sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa, sideaineina, komposiiteissa ja rakentamisessa. Epoksihartseilla on helppo saavuttaa halutut ominaisuudet ja niiden käsittely on yksinkertaista. [5, s. 8-9]

## 2.2 Epoksit

Erilaiset epoksit ovat yksi tärkeimmistä kertamuoviryhmistä. Epoksia ja epoksihartsia käytetään usein toistensa synonyymeinä. Tiukasti määritellen epoksihartsilla tarkoitetaan ainoastaan ristosilloittamattomia monomeerejä tai oligomeerejä, jotka sisältävät epoksiryhmiä [6, s. 156]. Käytännöllisemmin ilmaistuna epoksi on kertamuovi, ja epoksihartsi on yksi sen komponenteista. Tätä määritelmää käytetään myös tässä

opinnäytetyössä. Epoksihartsin lisäksi epokseissa on yleensä erilaisia kovettimia, kiihdyttimiä, liuottimia sekä kiinteitä lisäaineita. Käytetty epoksiharts, koveteaine sekä koveteprosessi yhdessä määrittävät epoksin lopulliset ominaisuudet [7]. Epoksisysteemi voi tarkoittaa asiayhteydestä riippuen joko valmista kovetettua epoksimuovia tai laajemmin esimerkiksi komposiittirakennetta, jossa on käytetty epoksia.

### **2.2.1 Epoksit materiaaliryhmänä**

Epokseja käytetään esimerkiksi pinnoitteina, sähköeristeinä, liimoina, komposiittien matriiseina sekä rakennusmateriaalina. Valittavalla epoksihartsilla sekä kovettimella tai katalyytillä voidaan vaikuttaa lopullisiin ominaisuuksiin. Epokseilla on monia ominaisuuksia, jotka tekevät niistä hyvän valinnan moniin erilaisiin sovelluksiin. Epoksit kiinnittyvät helposti erilaisiin pintoihin ja materiaaleihin. Kovetetut epoksit eivät reagoi helposti kemikaalien kanssa, eivätkä ne ole alttiita korroosiolle. Tietyillä epokseilla on korkea veto-, puristus- ja taivutuslujuus, ja ne vastustavat hyvin väsymistä. Toisaalta epoksit voivat olla myös hauraita, riippuen epoksissa käytetyistä komponenteista. Etenkin homopolymerisaatiolla ristosilloittuneet epoksit voivat käyttäytyä hauraasti. Epoksi kutistuu kovetusprosessissa hyvin vähän. Monet epoksit ovat herkkiä UV-valolle, ja voivat värjäytyä sille altistuessaan. Epoksien mekaaniset ominaisuudet voivat heikentyä huomattavasti korkeissa lämpötiloissa ja kosteissa olosuhteissa. [5, s. 216-217]

Koska epoksit ovat laaja materiaaliryhmä ja lähes rajattomasti muokattavissa, epoksien haitallisuudesta terveydelle ei voi tehdä koko materiaaliryhmää koskevia yleistyksiä. Terveysteen ja työturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä tulee aina tarkastella tietyn tunnetun epoksisysteemin kautta. Bisfenoli A-pohjaiset epoksihartsit ovat yksi yleisimmistä käytetyistä hartsiryhmistä, ja ne eivät ole ihmisille välittömästi myrkyllisiä. Ne eivät myöskään ole karsinogeenisiä tai perimää vaurioittavia. Pitkittynyt tai toistuva ihokontakti nestemäisten epoksihartsien kanssa voi johtaa ihoärsytykseen tai herkistymiseen. Nestemäiset epoksihartsit eivät höyrysty huoneenlämpötilassa, mutta niissä käytetyt liuottimet saattavat höyrystyä ja olla vaarallisia hengitettynä. Käytettävät kovetteet ovat pääsääntöisesti ihmisille epoksihartseja haitallisempia. Esimerkiksi alifaattiset amiinit ja anhydritit voivat aiheuttaa ihon tai silmien vakavaa ärtymistä, herkistymistä tai kemiallisia palovammoja. [6, s. 237-238]

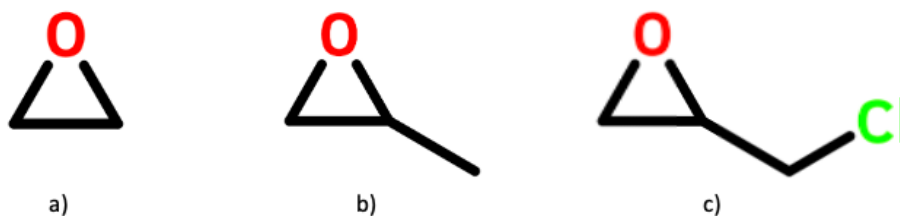
## 2.2.2 Epoksihartsit

Epoksihartsit ovat matalan polymerisaatioasteen polymeerejä, jotka toimivat lähtöaineina erilaisille epokseille. Epoksihartsien käsittelyn ja epoksisysteemin valmistuksen kannalta epoksihartsin viskositeetti on oleellinen ominaisuus. Viskositeetti riippuu aineen moolimassasta ja sen jakaumasta, hartsin kemiallisesta koostumuksesta sekä mahdollisten lisäaineiden ja liuottimien vaikutuksesta. Käytännössä kaikkien epoksihartsien viskositeetti huoneenlämmössä on niin suuri, että käsittely vaatii hartsin lämmittämistä, mikäli siihen ei ole lisätty viskositeettia pienentäviä lisäaineita, kuten liuottimia. [8, s. 776-778] Nestemäisten epoksihartsien korkea viskositeetti vaikeuttaa epoksihartsin ja kovetteen sekoittumista. Epähomogeeninen seos ei tuota tasaista verkkopolymeerirakennetta ja vaikuttaa negatiivisesti epoksin ominaisuuksiin. [6, s. 183-184]

Epoksihartseja voidaan luokitella useilla eri tavoilla, eikä vakiintunutta käytäntöä ole. Tyypillisesti luokittelu tehdään kemiallisen rakenteen tai ominaisuuksien perusteella. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [6] jakaa epoksihartsit seuraaviin pääryhmiin. *Halogenoidut epoksihartsit* sisältävät tyypillisesti joko klooria, bromia tai fluoria. Bromatut epoksihartsit toimivat palonestoaineina ja niitä käytetään jonkin verran elektroniikkateollisuudessa. Fluoratut epoksihartsit vastustavat erittäin hyvin kemikaaleja ja mekaanista kuormitusta, mutta niiden laajempaa käyttöä hidastaa niiden matala lasisiirtymälämpötila sekä korkea hinta. *Monifunktionaalisten epoksihartsien ryhmään* kuuluvat esimerkiksi erilaiset novolakat sekä fenolien ja aldehydien kondensaatioreaktioilla tuotetut epoksihartsit. Näitä hyödynnetään lähinnä ilmailu- ja avaruusteollisuudessa niiden korkean hinnan vuoksi. *Erikoiskäyttöön suunniteltuihin epoksihartseihin* kuuluu esimerkiksi erilaisia säänkestäviä ja elastomeereillä seostettuja epoksihartseja, joilla on parempi iskulujuus ja sitkeys. Lisäksi oman ryhmänsä muodostaa erilaiset *glysidyyli-pohjaiset epoksihartsit*. Glysidyyli-pohjaiset epoksihartsit valmistetaan epikloorihydriinistä, ja ne voidaan edelleen jakaa glysidyyliettereihin, -estereihin sekä -amiineihin. Kaupallisesti merkittävin epoksihartsi on glysidyyli-pohjainen DGEBA, joka esitellään tarkemmin alaluvussa 2.3.1. [6, s. 160-182]

Epoksihartseja valmistetaan epoksideista kemiallisilla reaktioilla. Epoksideihin kuuluvat yhdisteet, joiden rakenteessa on vähintään yksi epoksiryhmä. Epoksiryhmä on kolmiatominen rengas, joka koostuu yhdestä happiatomista ja kahdesta hiiliatomista. Epoksiryhmää kutsutaan lähteestä riippuen myös epoksidi- tai oksiraaniryhmäksi. Epoksirengas on erittäin reaktiivinen voimakkaan polaarisuuden johdosta. Tärkeimmät ryhmään kuuluvat yhdisteet ovat etyleenioksidi, propyleenioksidi sekä epikloorihydriini.

Kuvassa 1 on esitetty etyleenioksidin (kuva 1, a), propyleenioksidin (kuva 1, b) ja epikloorihydriinin (kuva 1, c) rakenteet, joista on helposti tunnistettavissa renkaaksi sitoutunut epoksiryhmä.



**Kuva 1.** Etyleenioksidin (a), propyleenioksidin (b) ja epikloorihydriinin (c) rakennekaavat [9].

Epikloorihydriini on tärkein epoksihartsien valmistukseen käytettävistä raaka-aineista. Epikloorihydriinissä sekä epoksiryhmä että kloori ovat funktionaalisia ryhmiä. Epikloorihydriinin kemiallisissa reaktioissa reaktioon osallistuu joko epoksiryhmä tai kloori, riippuen muista reaktioon osallistuvista aineista ja reaktio-olosuhteista. [10, s. 147]

Epoksin kovettuessa epoksihartsissa olevat epoksiryhmät reagoivat kovetteen tai muiden reaktioon osallistuvien aineiden kanssa, minkä johdosta kovetetussa epoksisysteemissä on hyvin vähän tai ei lainkaan epoksiryhmiä. [6, s. 156] Epoksihartsi voidaan kovettaa epoksiksi kahdella eri tavalla. Mikäli epoksi valmistetaan ilman kovetetta, käytetään happo- tai emäskatalyyttiä. Tällöin epoksihartsin monomeerit muodostavat silloittuneen, kolmiulotteisen homopolymeerirakenteen. Silloittuminen tapahtuu epoksiryhmän happiatomiin kohdistuvalla eliminaatioreaktiolla. Toisessa menetelmässä epoksi valmistetaan kovetteen avulla. Tällöin epoksihartsi ja kovete muodostavat yhdessä kopolymeerirakenteen kovetusreaktiossa. Kopolymeerirakenteessa ominaisuudet riippuvat sekä hartsi- että kovetekomponenteista, joten ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa komponenttien valinnalla ja määrällä. Molemmilla tavoilla kovettettujen epoksien rakenne on kolmiulotteinen verkko, joka tekee epokseista sulamattomia ja liukenemattomia kertamuoveja. [5, s. 191-192] [11, s. 152-155]

### 2.2.3 Kovetteet

Käytännössä kaikki epoksihartsit kovetetaan lopullista käyttötarkoitustaan varten kertamuoviksi, eli epoksiksi. Epoksihartsimonomeerit saadaan kovettumaan ja muodostamaan verkottunut homopolymeerirakenne käyttämällä sopivaa katalyyttiä.

Tavallisempaa kuitenkin on käyttää sopivaa koveteainetta, jolloin muodostuu kopolymeerirakenne. Kovetteenkin kanssa voidaan käyttää katalyyttiä tai muita lisäaineita. Lisäaineet jäävät niin ikään epoksin lopulliseen rakenteeseen. Käytetyt komponentit ja käytetty kovetusprosessi yhdessä määräävät epoksin lopulliset ominaisuudet. Kovetussysteemillä tarkoitetaan kovetusprosessissa käytettyjä kovetteita, katalyyttejä, muita lisäaineita sekä kovetusolosuhteita, kuten lämpötilaa. Erilaiset kovetussysteemit tuottavat erilaisia kertamuoveja. Usein kovetus suoritetaan pitämällä systeemi tietyn aikaa tietyssä tarkasti määritellyssä lämpötilassa. Kovetus voidaan tehdä useassa vaiheessa käyttäen erilaisia lämpötilan ja ajan yhdistelmiä. Erilaisten lämpötila-aika-syklien avulla ristosilloittumista voidaan kontrolloida ja epoksille saadaan halutut ominaisuudet.

Kovetteen valinta riippuu epoksin valmistusmenetelmästä, kovetusolosuhteista ja epoksin toivotuista ominaisuuksista. Myös epoksisysteemin käyttöaika (engl. pot life) tulee huomioida. Käyttöajalla tarkoitetaan sitä aikaa, joka kuluu epoksisysteemin komponenttien sekoittamisesta epoksin kovettumiseen. Tietyillä hartsien ja kovetteiden seoksilla käyttöaika on vain muutamia minuutteja [8, s. 778]. Valittu kovete vaikuttaa seoksen viskositeettiin ja seoksen reaktiivisuuteen. Kovete määrittää, minkälaisia sidoksia ristosilloituksessa muodostuu ja kuinka paljon. Ristosilloittumisen aste ja laatu vaikuttavat lopullisen kovetetun epoksin kemiallisiin, termisiin, mekaanisiin ja sähköisiin ominaisuuksiin. Epoksihartseissa sekä epoksiryhmä että hydroksyyli ryhmä voivat osallistua ristosiltojen muodostamiseen. Nestemäisillä pienimolekyylisillä epoksihartseilla ristosilloittuminen tapahtuu pääasiassa epoksiryhmien kautta. Suurimolekyylisissä epoksihartseissa hydroksyyli ryhmien määrä yhtä monomeeriä kohti kasvaa, ja ristosilloittuminen voi tapahtua joko epoksiryhmien tai hydroksyyli ryhmien kautta, riippuen käytettävästä kovetteesta ja olosuhteista. Epoksiryhmien reagoidessa epoksiryhmän rengas avautuu. Koska renkaan avautuessa ei muodostu sivutuotteita, epoksit eivät kovettuessaan juuri kutistu, ja pitävät näin mittansa erittäin hyvin. Epoksirenkaan reaktiivisuus mahdollistaa epoksihartsien reaktiot monien erilaisten aineiden kanssa, myös hyvin vaihtelevissa olosuhteissa. Mikäli hydroksyyli ryhmät osallistuvat ristosilloituksen muodostumiseen, reaktiossa muodostuu yleensä pienimolekyylinen sivutuote, kuten vesi tai alkoholi. Tästä syystä kovetusprosessissa tulee käyttää lämpöä, jotta haihtuvat sivutuotteet saadaan poistettua ja kovetus onnistuu. [6, s. 185-187]

Erilaisia kovetteita on suuri määrä, ja niitä voidaan luokitella eri tavoin. Yksi tapa kovetteiden luokitteluun on jakaa ne kahteen ryhmään sen mukaan, ovatko ne mukana lopullisessa kertamuovin rakenteessa vai eivät. *Katalyyttiset kovetteet* katalysoivat epoksihartsimonomeerien polymerisaatiota, jolloin reaktiotuote on homopolymeeri.

Katalyyttiset kovetteet eivät itse kulu reaktiossa. *Ristisilloituskovetteet* osallistuvat kovetusreaktioon komonomeerinä epoksihartsin lisäksi, jolloin reaktiotuotteena syntyy kopolymeeri. [6, s. 186] Joissain kovetesysteemeissä voidaan käyttää sekä katalyyttisiä kovetteita että ristisilloituskovetteita [8, s. 778]. Katalyyttisiä kovetteita käytetään suhteellisen pieniä määriä verrattuna käytettävän epoksihartsin määrään. Toisin kuin katalyyttisien kovetteiden kanssa, ristisilloituskovetteita käytettäessä reaktion stoikiometria vaikuttaa vaadittavaan kovetteen määrään. Toisaalta kaikkia epoksien kovettumiseen liittyviä reaktiomekanismeja ei täysin ymmärretä, ja käytännön kokemuksen pohjalta lähtöaineiden määrän suhdetta muokataan niin, että saadaan mahdollisimman hyvä saanto ja halutut ominaisuudet. [5, s. 200-201]

On tärkeää huomata, että tietty kovete voi osallistua kovetusreaktioon eri tavoin, riippuen käytettävästä epoksihartsista, lisäaineista sekä kovetusolosuhteista. Katalyyttisistä kovetteista tärkeimpiä ovat tertiääriset amiinit. Tertiäärisiä amiineja voidaan käyttää myös kiihdyttämään reaktioita, joissa varsinaisena kovetteena toimii ristisilloitukseen osallistuva komonomeeri, yleensä happoanhydridi. Ristisilloituskovetteet ovat huomattavasti käytetympiä kuin katalyyttiset kovetteet. Tärkeimpiä ristisilloituskovetteita ovat primääriset ja sekundääriset amiinit. [6, s. 185-187, 201-203] Primääriset ja sekundääriset amiinit reagoivat monomeerin epoksiryhmän kanssa polyadditioreaktiolla, jossa epoksiryhmän rengasrakenne aukeaa. Suurin osa amiinikovetteista voi aiheuttaa allergista kosketushottumaa ja ärsyttää ihoa ja silmiä, ja osa on myös todettu todennäköisiksi karsinogeeneiksi. [8, s. 778] [12] Amiinien jälkeen suosituimpia kovetteita ovat erilaiset karboksyylliset polyesterit sekä happoanhydritit. Anhydridijohdannaisia käytetään etenkin komposiittisovelluksissa myrkyllisempien aromaattisten amiinien sijasta. [6, s. 195-196] Myös happoanhydritit voivat aiheuttaa iho-oireita, mutta pääsääntöisesti ne eivät ole yhtä vahvoja kuin amiinit [8, s. 781]. Edellä mainittujen koveteryhmien lisäksi markkinoilla on saatavilla suuri joukko muitakin kovetteita ja niiden erilaisia johdannaisia, joille on tiettyjä erityisiä sovelluskohteita. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset merkaptaanit sekä yhdisteet, joissa fenoliryhmä ei ole keskellä ketjua [6, s. 199-200].

Epoksin kovettumiseen vaadittava aika riippuu käytetyistä lähtöaineista sekä ympäristön lämpötilasta. Usein kovetukseen käytetään kohotettua lämpötilaa, jolloin epoksin rakenteesta saadaan homogeenisempi ja saavutetaan halutut ominaisuudet. Yleisimmät amiinipohjaiset kovetteet tarvitsevat lyhyempiä aikoja ja matalampia lämpötiloja epoksin kovettamiseen, kuin anhydridipohjaiset kovetteet, sillä oletuksella, että epoksiharts on pienimolekyylinen ja epikloorihydriinipohjainen. [8, s. 776] Happoanhydridipohjaiset kovetteet kovettavat epoksin suhteellisen hitaasti vielä 200 °C:ssa. Erilaisilla

kiihdyttimillä reaktiota voidaan nopeuttaa ja usein laskea reaktion vaatimaa lämpötilaa. [6, s. 196] Kovetusreaktiot ovat sitä monimutkaisempia mitä enemmän aineita niihin osallistuu, eikä läheskään kaikkia reaktiomekanismeja tunneta. Monimutkaisissa tapauksissa potentiaalisia reaktiomekanismeja on useita, ja eri reaktiot kilpailevat keskenään. Tämä vaikuttaa lopullisen epoksin ominaisuuksiin. Epoksin huolellinen suunnittelu vaatii komponenttien tuntemusta.

## 2.2.4 Lisäaineet

Erilaisilla lisäaineilla voidaan vaikuttaa merkittävästi paitsi epoksin lopullisiin ominaisuuksiin, myös niiden käsittelyyn valmistusprosessin aikana. Lisäaineiden määrän kasvaessa valmistusprosessi usein monimutkaistuu ja vaatii enemmän suunnittelua, jotta kulloinkin halutut kemialliset reaktiot saadaan toteutumaan. Täysin seostamattomilla epoksihartseilla voi olla tiettyjä epäedullisia piirteitä, kuten korkea viskositeetti, korkea hinta tai kovetettuna liian suuri jäykkyys tiettyihin sovelluskohteisiin. [8, s. 789] Kovetteet ovat harvoin ainoita epoksiin lisättäviä yhdisteitä, vaan niihin sekoitetaan usein erilaisia kiihdytteitä, ohenteita, täyteaineita ja pehmitteitä. Epoksin koostumusta valittaessa on tärkeää ymmärtää miten komponentit vaikuttavat toisiinsa. Kun epoksihartsilta halutaan tiettyä käsiteltävyyttä ja ominaisuuksia, seuraavat tekijät tulee ottaa huomioon:

1. Sopivan epoksihartsin ja kovetteen yhdistelmä,
2. Epoksihartsin ja kovetteen stoikiometrinen suhde,
3. Sopivan katalyytin ja/tai kiihdytteen valinta,
4. Kovetuksen ja jälkikovuksen olosuhteet ja prosessi
5. Koostumusta muokkaavat säätöaineet, kuten täyteaineet, ohenteet ja sitkeyttä lisäävät aineet,
6. Seoksen komponenttien ja mahdollisten komposiittipartikkelien keskinäisten reaktioiden vaikutus epoksisysteemin kemiaan, rakenteeseen ja ominaisuuksiin.

[6, s. 204]

Katalyytit voidaan luokitella myös kovetteiksi alaluvussa 2.2.3 esitellyn mukaisesti. Katalyyttejä voidaan käyttää joko yksinään tai yhdessä varsinaisen koveteaineen kanssa. Erityisesti tertiäärisiä amiineja käytetään yhdessä happoanhydridikovetteiden kanssa. Tertiääristen amiinien lisäksi katalyytteinä käytetään esimerkiksi erilaisia imidatsoleja, jotka ovat tertiäärisiä amiineja tehokkaampia katalyyttejä. Katalyyttien

käytössä määrät ovat erittäin oleellisia halutun lopputuloksen kannalta, ja imidatsoleja riittää usein karkeasti noin puolet tertiääristen amiinien määrästä samaan lopputulokseen. Mikäli kovetusprosessissa on useampia kilpailevia reaktioita, katalyytit voivat vaikuttaa siihen, minkä reaktion toteutuminen on todennäköisintä. Toisinaan kirjallisuudessa käytetään kiihdytteitä ja katalyyttejä toistensa synonyymeinä. Kiihdytteillä nopeutetaan epoksin kovettumisreaktiota. Kiihdytteet nostavat katalysoitujen reaktioiden nopeutta, mutta eivät itse katalysoi reaktiota, joten kyseessä on kaksi eri tavoin toimivaa lisäainetta. Kiihdytteinä voidaan käyttää esimerkiksi fenoleita ja bentsyylialkoholeja. [6, s. 209]

Ohenteilla voidaan laskea epoksihartsin viskositeettia. Matalampi viskositeetti helpottaa epoksihartsin käsittelyä ja sekoittamista ennen kovettamista. Ohenteet hankaloittavat kovettumisprosessia ja vaikuttavat negatiivisesti useisiin epoksien haluttuihin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Ohenteet ovat usein reaktiivisia, eli ne reagoivat epoksin muiden komponenttien kanssa. Aiemmin ohenteina käytettiin erilaisia orgaanisia liuottimia, mutta niistä on enimmäkseen luovuttu niiden ympäristöhaitallisuuden vuoksi. Näiden sijaan käytetään usein esimerkiksi butyyliglysidyylietteriä ja fenolisia glysidyyliettereitä. [8, s. 789]

Erilaisia täyteaineita käytetään erityisesti työkalujen, muottien ja valuhartsien valmistuksessa. Täyteaineina käytetään sovelluksesta riippuen esimerkiksi hiekkaa, jauhattua lasikuitua ja metallijauhetta. Täyteaineiden käytöllä voidaan esimerkiksi laskea hintaa, pienentää kovettumisesta johtuvaa kutistumista, pienentää lämpölaajenemiskerrointia sekä parantaa lämmönjohtavuutta. [8, s. 789]

Epoksien joustavuutta ja sitkeyttä voidaan parantaa käyttämällä erilaisia pehmitteitä (engl. flexibilizer). Tavalliset muovien kanssa käytettävät pehmitteet (engl. plasticizer) kuten ftalaatit eivät yleensä toimi epoksihartsien kanssa. Epoksien pehmitteinä voidaan käyttää esimerkiksi matalan moolimassan polysulfideja ja polyamideja. Toisaalta joustavampi epoksi voidaan saavuttaa myös valitsemalla sopiva epoksihartsi, kuten polyglykoli, jossa on kaksi epoksiryhmää. Polyglykolit muodostavat yksinään muita epoksihartseja joustavamman rakenteen. Polyglykoleja voidaan joissain tapauksissa käyttää myös yhdessä muiden epoksihartsien kanssa. [8, s. 789]

## 2.3 Sähkömoottoreissa käytettävä epoksisysteemi

Sähkömoottoreiden valmistuksessa epoksihartseja käytetään staattorien käämityksessä, jossa ne toimivat sähköisenä eristeenä ja jäykistävät käämityksen rakennetta. Käytetyimmässä sähkömoottoreiden epoksisysteemissä epoksihartsina

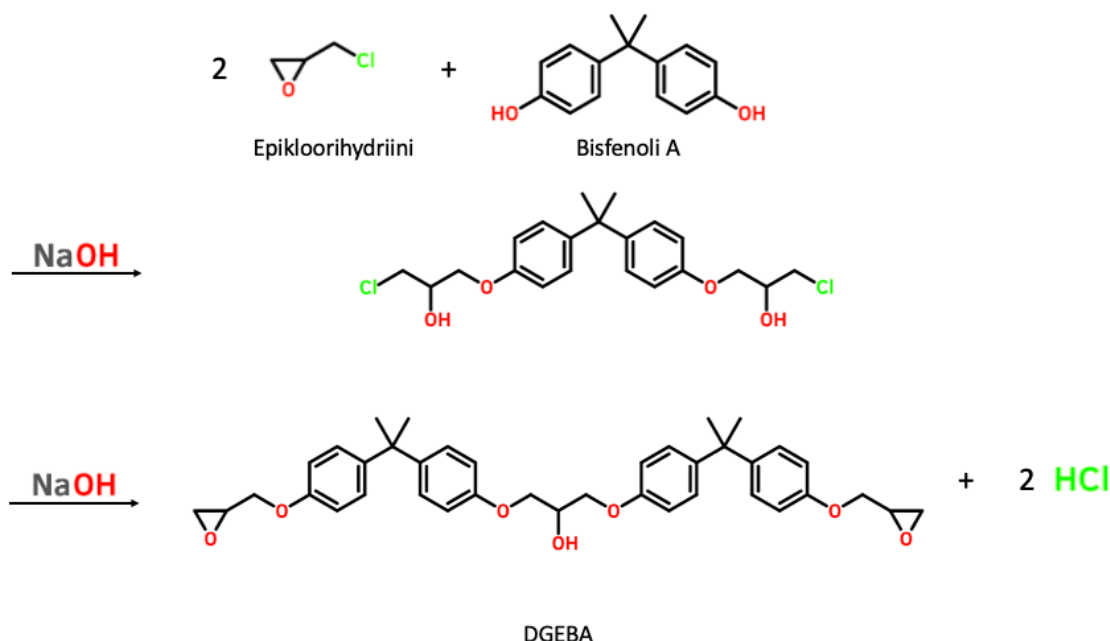


käytetään bisfenoli A:n diglysidyylietteriä (DGEBA), ja kovetteena käytetään metyyliheksahydroftaalihappoanhydridiä (MHHPA). Epoksi lisätään komponentteihin tyhjiökyllästysmenetelmällä. [13] DGEBA/MHHPA-systeemiä käytetään etenkin sähkömoottoreiden valmistuksessa, mutta myös esimerkiksi mikroelektroniikassa [14]. DGEBA/MHHPA-systeemin lisäksi sähkömoottoreissa käytetään toisinaan myös polyesterihartsin perustuvaa kertamuovia, mutta etenkin suurjännitemoottoreissa epoksin käyttö on huomattavasti yleisempää [15, s. 106]. DGEBA:n keskeiset ominaisuudet ja valmistus esitellään alaluvussa 2.3.1, MHHPA:n keskeiset ominaisuudet ja epoksin kovettaminen esitellään alaluvussa 2.3.2. Alaluvussa 2.3.3 esitellään epoksisysteemin yleisimmät lisäaineet sekä niiden ominaisuudet. Sähkömoottoreita ja epoksien käyttöä niiden valmistuksessa käsitellään alaluvussa 2.4.

### 2.3.1 Epoksihartsi DGEBA

DGEBA on käytetyin epoksihartsi sekä sähkömoottoreiden valmistuksessa että kaikissa sovelluksissa yhteensä [13]. Moolimassasta riippuen DGEBA voi olla nestemäistä tai kiinteää, mutta matalissa lämpötiloissa sulavaa. DGEBA:ssa on reaktiokykyisiä epoksi- ja hydroksyyliyhmiä, joiden avulla epoksihartsin kovettuminen epoksiksi saadaan aikaan sopivaa kovetetta hyödyntäen. [11, s. 153] DGEBA:ssa olevat bisfenoli A:sta peräisin olevat bentseenirenkaat tuovat kovetetulle epoksille lujuutta, jäykkyyttä ja soveltuvuutta korkeisiin lämpötiloihin. Happisillat, hydroksyyliyhmiä ja epoksiryhmät mahdollistavat DGEBA:n reaktiot monien yhdisteiden kanssa, epoksihartsien räätälöinnin sekä epoksien hyvät tarttuvuusominaisuudet erilaisiin pintoihin. Kovetetuilla DGEBA-pohjaisilla epoksihartseilla on tiheäsidoksinen verkkopolymeerirakenne, jolla on suuri lujuus ja kovuus mutta rajallinen joustavuus ja sitkeys. [6, s. 162]

Kaupalliset nestemäiset epoksihartsit koostuvat pääosin matalan moolimassan DGEBA:sta sekä pienestä määrästä korkeamman moolimassan oligomeereistä [8, s. 774]. DGEBA valmistetaan epikloorihydriinistä ja bisfenoli A:sta antamalla niiden reagoida alkalisessa liuoksessa [11, s. 153]. DGEBA:n synteesin kokonaisreaktio on esitetty kuvassa 2. Reaktiomekanismia ei tunneta kunnolla, mutta sen uskotaan tapahtuvan kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa natriumhydroksidi katalysoi epikloorihydriinin epoksirenkaan avautumista ja liittymistä bisfenoli A:n hydroksyyliyhmiin. Toisessa vaiheessa kloori reagoi vapaiden vetyionien kanssa muodostaen vetykloridia, jolloin bisfenoli A:han liittyneeseen ryhmään muodostuu uusi epoksirenkas.



**Kuva 2.** DGEBA:n synteesi [8, s. 775].

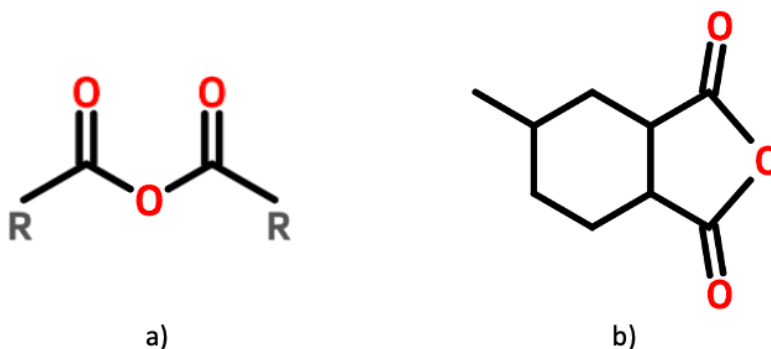
Kokeellisesti on havaittu, että mikäli reaktiossa käytettäisiin stoikiometrian mukaisesti lähtöaineiden suhdetta 2:1, DGEBA:n saannoksi tulisi alle 10 %. Reaktiossa muodostuisi tällöin DGEBA:ta pidempiä polymeeriketjuja. [8, s. 775] Pidemmät polymeeriketjut epoksihartsissa vaikuttavat kovetusreaktiossa muodostuvaan verkkorakenteeseen ja epoksin lopullisiin ominaisuuksiin niin, ettei haluttuja ominaisuuksia välttämättä saavuteta. Jotta reaktiossa saadaan monomeerista DGEBA:ta, käytetään epikloorihydrinin selkeää ylimäärää. Epikloorihydriniä voidaan käyttää jopa kymmenkertainen määrä bisfenoli A:han verrattuna [6, s. 163]. DGEBA:n suhteellinen moolimassa on 340 g/mol, ja useimpien kaupallisten nestemäisten epoksihartsien suhteellinen moolimassa on välillä 340-400 g/mol. [8, s. 776]

### 2.3.2 DGEBA:n kovetteena käytettävä MHHPA

Metyyliheksahydroftaalihappoanhydridi MHHPA on syklinen happoanhydridi, jota käytetään epoksihartsien, kuten DGEBA:n kovetukseen. MHHPA:ta ja muita happoanhydridipohjaisia kovetteita käytetään lähinnä joissain komposiiteissa sekä sähköeristeinä. Happoanhydridipohjaisia kovetteita on rakenteeltaan useita erilaisia, mutta useimmiten käytetään niitä, jotka ovat huoneenlämmössä nestemäisiä, koska niiden käsittely on helpointa. MHHPA:n sulamispiste on -29 °C, joten sitä ei tarvitse erikseen lämmittää komponenttien sekoitusta varten [16]. Epoksisysteemin

kovettuminen happoanhydridikovetteilla vaatii korkean lämpötilan. Epoksisysteemistä riippuen voidaan käyttää katalyyttejä ja kiihdyttimiä, jotta kovetus aika on kohtuullinen. Tyypillisesti katalyytit ovat tertiäärisiä amiineja. Usein tarvitaan jälkikovuusvaihe, jolla varmistetaan halutut ominaisuudet. [6, s. 196-197]

Kuvassa 3 on esitetty happoanhydridien toiminnallinen ryhmä (kuva 3, a) sekä MHHPA:n kemiallinen rakenne (kuva 3, b), josta voidaan tunnistaa renkaaksi sitoutunut happoanhydridiryhmä. Happoanhydridit ovat karboksyylihappojen johdannaisia [17, s. 203]. Happoanhydridikovetteita yhdistää rakenteessa oleva happoanhydridiryhmä. Ristisilloittuminen tapahtuu happoanhydridiryhmän reagoidessa epoksihartsin toiminnallisten ryhmien kanssa, ellei happoanhydridin rakenteessa ole muita toiminnallisia ryhmiä, jotka voivat reagoida. [6, s. 197]

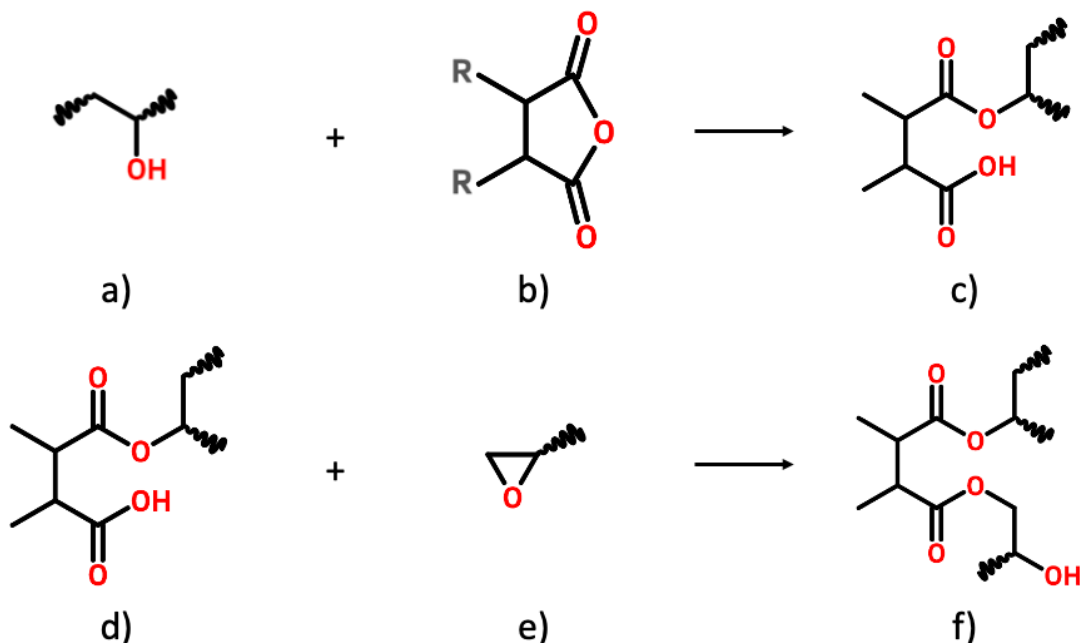


**Kuva 3.** a) Happoanhydridien toiminnallinen ryhmä [17, s. 203] ja b) MHHPA:n rakenne [6, s. 198].

Happoanhydridikovuksen reaktiomekanismi on monimutkainen eikä sitä vielä täysin tunneta, sillä kovetukseen liittyy keskenään kilpailevia reaktioita. Katalyyteillä, muilla lisäaineilla ja kovetusprosessin olosuhteilla voidaan jonkin verran vaikuttaa siihen, mitkä kilpailevista reaktioista toteutuvat. [6, 197-199] Epoksin komponenttien valmistajat tarjoavat tietoa käyttömääristä ja seossuhteista. Lisäksi tarvitaan käytännön kokemusta epoksin käyttäytymisestä käytettävässä valmistusmenetelmässä ja -olosuhteissa. [5, s. 216] Näiden tietojen perusteella epoksia ja valmistusmenetelmää voidaan räätälöidä niin, että epoksille saadaan optimaaliset ominaisuudet.

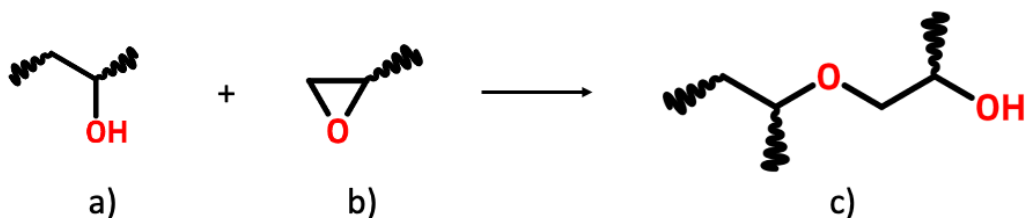
Kovettumisreaktiossa MHHPA:n ja DGEBA:n välille voi muodostua joko ester- tai eetteriryhmä, joka sitoo epoksihartsin ja kovetteen kestäväksi polymeeriverkoksi. Kuvassa 4 on esitetty epoksihartsin ja happoanhydridin välinen ristisilloittuminen, jossa muodostuu esteriryhmä. Kuvassa R tarkoittaa happoanhydridin sivuryhmiä ja aaltoviivalla merkitty sidos tarkoittaa reaktion kannalta epäoleellista rakennetta. Reaktion uskotaan tapahtuvan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa epoksihartsin sekundääriset alkoholit (kuva 4, a) reagoivat happoanhydridiryhmän (kuva 4, b) kanssa

muodostaen välituotteen (kuva 4, c). Sekundäärisen alkoholiryhmän vety liittyy avautuvaan renkaaseen muodostaen karboksyyliiryhmän. Toisessa vaiheessa välituote (kuva 4, d) reagoi epoksihartsin epoksiryhmän (kuva 4, e) kanssa muodostaen diesterin (kuva 4, f). [6 s. 197]



**Kuva 4.** Epoksihartsin ja happoanhydridikovetteen välisen ristosilloituksen muodostuminen esteröitymällä [6, s. 197].

Edellä kuvatun esteröitymisen kanssa kilpailevassa reaktiossa muodostuu eetteriryhmä. Eetteriryhmän muodostuminen on kuvattu kuvassa 5. Kilpailevassa reaktiossa sekundäärinen hydroksyyliiryhmä (kuva 5, a) reagoi epoksihartsin epoksiryhmän (kuva 5, b) kanssa muodostaen eetterisidoksen (kuva 5, c). Hydroksyyliiryhmä voi osallistua eetteriryhmän muodostavaan reaktioon riippumatta siitä, onko se osa epoksihartsia vai onko hydroksyyliiryhmä muodostunut edellä kuvatun esteröitymisen yhteydessä (kuva 4). [6, s. 197]



**Kuva 5.** Epoksihartsin ja happoanhydridikovetteen välinen eetteriryhmän muodostuminen [6, s. 197].

Kokeellisesti on todettu kuvassa 5 esitetyn eetteriryhmän muodostumisen olevan hallitseva reaktiomekanismi. Optimaalinen ristosilloitustiheys ja epoksin halutut

ominaisuudet voidaan saavuttaa ilman katalyyttejä ja vaikka happoanhydridikövetetta käytettäisiin vain noin 85 %:a epoksihartsin ainemäärästä, mutta prosessi on tällöin hidas korkeassakin lämpötilassa. [6, s. 197]

### 3. EPOKSIT SÄHKÖMOOTTOREIDEN VALMISTUKSESSA

Sähkömoottorit ovat pyöriviä sähkökoneita, jotka muuttavat sähköenergiaa liike-energiaksi. Erilaisia sähkömoottoreita on lukuisia erilaisia. Sähkömoottoreita käytetään esimerkiksi metalli-, kaivos-, rakennus- ja prosessiteollisuudessa. Käytettävän sähkön perusteella sähkömoottorit voidaan jakaa *tasasähkömoottoreihin* ja *vaihtosähkömoottoreihin*. Teollisuudessa käytetään lähinnä vaihtosähkömoottoreita [18, s. 59]. Vaihtosähkömoottoreiden toiminta perustuu sähkövirran aiheuttamaan pyörivään magneettikenttään, joka aiheuttaa vääntömomentin koneen pyörivään osaan. Koneen pyörivä osa voi pyöriä joko samalla tai eri nopeudella magneettikentän suhteen. Tämän perusteella vaihtosähkömoottorit jaetaan *tahtimoottoreihin* ja *epätahtimoottoreihin*. Epätahtimoottorit voidaan edelleen jakaa *yksivaiheisiin induktiomoottoreihin*, *kolmivaiheisiin induktiomoottoreihin* sekä *liukurengasmoottoreihin*. Induktiomoottoreissa ja liukurengasmoottoreissa roottorin rakenne on erilainen. [19]

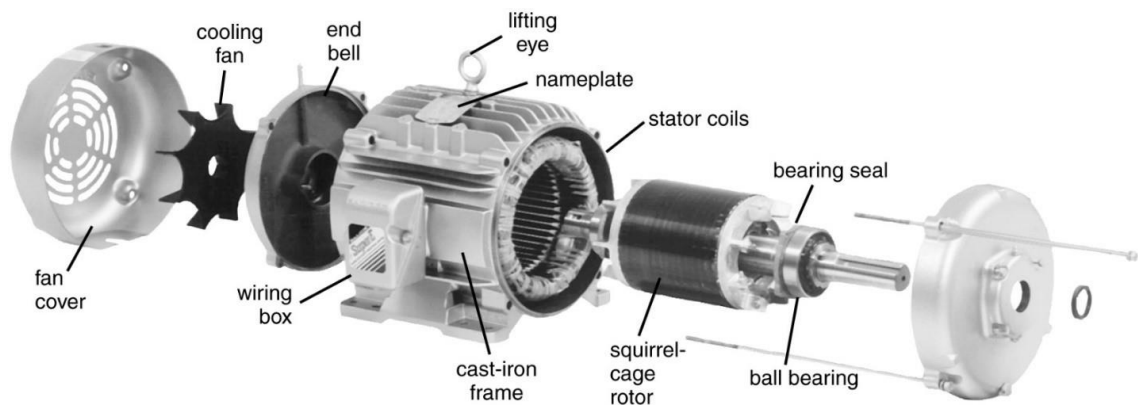
Induktiomoottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, minkä johdosta niitä voidaan valmistaa suurissa erissä. Ne ovat myös kestäviä ja edullisia. [18, s. 59] Tässä opinnäytetyössä tarkastelu on rajattu koskemaan ainoastaan kolmivaiheisia suurjänniteinduktiomoottoreita ja epoksien käyttöä niiden valmistuksessa. Suurjännitemoottoreissa nimellisjännite on yli 35 kV, keskijännitemoottoreissa nimellisjännite on välillä 1 kV - 35 kV, ja matalajännitemoottoreissa nimellisjännite on alle 1 kV [20]. Kolmivaiheisia induktiomoottoreita voidaan käyttää myös generaattoreina, mutta generaattorien toiminnan tarkastelu sivuutetaan tässä opinnäytetyössä, kuten myös moottoreiden sähkömagneettisen toiminnan selittäminen.

Alaluvussa 3.1 esitellään sähkömoottoreiden perusrakenne sekä tarkasteluun valittu kolmivaiheinen induktiomoottori, alaluvussa 3.2 komponentti, jossa epoksia käytetään, alaluvussa 3.3 epoksien rooli sähkömoottoreiden valmistuksessa sekä alaluvussa 3.4 epoksien käyttöön liittyvä tyhjiökyllästysmenetelmä. Alaluvussa 3.5 käsitellään sähkömoottoreiden valmistuksessa käytettävien anhydridikovetteiden vaihtoehtoja.

#### 3.1 Kolmivaiheisen induktiomoottorin perusrakenne

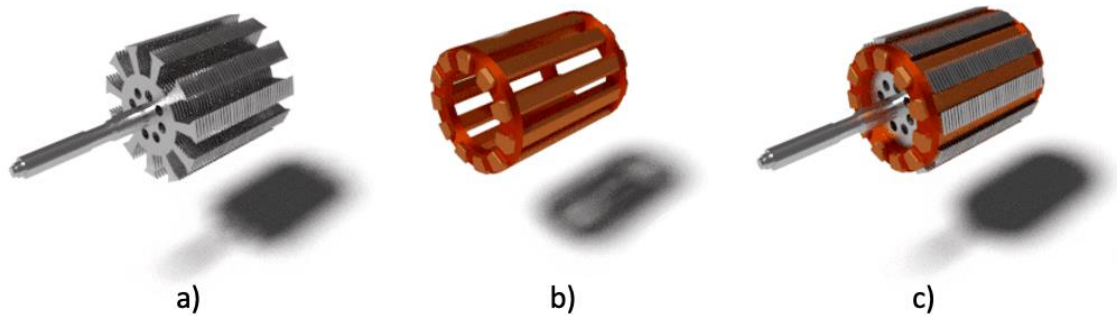
Induktiomoottori on yleisin teollisuudessa käytettävä sähkömoottorityyppi [18, s. 59]. Induktiomoottorin kaksi keskeisintä osaa ovat staattori ja roottori, jotka ovat moottorin sähköisen toiminnan kannalta aktiivisia osia. Kaikki muut induktiomoottorin osat, kuten

staattorin runko, laakerit ja akseli, ovat passiivisia. Passiivisten osien tehtäviä ovat esimerkiksi pitää aktiiviset osat paikoillaan, johtaa sähköä moottoriin sekä välittää moottorin tuottama liike-energia. [19] Kolmivaiheisen induktiomootorin perusrakenne on esitetty kuvassa 6. Kolmivaiheisen induktiomootorin staattorin käämiin syötettävä kolmivaiheinen sähköenergia tuottaa pyörivän magneettikentän. Sähköteho viedään koneen roottoriin sähkömagneettisen induktion avulla [18, s. 59]. Staattorin ja roottorin magneettikenttien vuorovaikutus saa aikaan moottorin vääntömomentin, jota hyödynnetään ulkoisen kuorman ohjaamisessa [21, s. 1].



**Kuva 6.** Kolmivaiheisen induktiomootorin perusrakenne [22].

Induktiomootoreissa käytetään oikosulkuroottoreita (kuva 6, squirrel-cage rotor). Tyypillisen oikosulkuroottorin rakenne on esitetty kuvassa 7. Oikosulkuroottori koostuu roottorin ytimestä (kuva 7, a) sekä häkkikäämyksestä (kuva 7, b). Suurjännitemootoreissa roottorin ydin muodostuu ohuista, reunaltaan uritetuista sähköteräslevyistä [23, s. 150], jotka ladotaan tiiviisti peräkkäin. Häkkikäämyksessä koostuu roottorin ytimen uriin asetettavista sauvoista ja päätyjen oikosulkurenkaista. Oikosulkurenkaiden päissä on yleensä siivekkeitä, jotka auttavat moottorin jäähdyttämisessä. [19] Suurjännitemootoreiden häkkikäämyksessä voidaan valmistaa kuparista, kupariseoksesta tai alumiinista, riippuen moottorin käyttötarkoituksesta [24].



**Kuva 7.** Oikosulkuroottorin perusrakenne. a) Roottorin ydin ja moottorin akseli, b) häkkikäänitys, c) oikosulkuroottorin kokoonpano [25].

Erilaisten moottoreiden staattorit ovat rakenteeltaan hyvin samankaltaisia. Suurjännitemoottoreissa staattorin ydin koostuu yleensä vastaavista sähköteräslevyistä kuin roottorikin. Staattorin valmistuksessa ohuet sähköteräslevyt ladotaan tiiviisti päällekkäin, jonka jälkeen staattorin ydin hitsataan ja koneistetaan lopulliseen muotoon. [21, s. 240] Staattorin ytimen sisäkehä on uritettu. Näihin uriin asennetaan staattorikäänitys (kuva 6, stator coils). Kolmivaihevirran jokaiselle vaiheelle on oma kääminsä. Käämi voi muodostua yhdestä tai useammasta vyyhdistä. [18, s. 59] Staattorikäänit valmistetaan joko kuparista tai alumiinista. Yksittäisten vyyhtien ja käämien ympärillä on eriste, usein kertamuovi, jolla estetään käämityksen oikosulku. [21, s. 232] Kun staattorikäänitys on asennettu, staattori koteloidaan tai kyllästetään ja kovetetaan. Suurjännitemoottoreissa staattori kyllästetään tyhjiökyllästysmenetelmällä käyttämällä epoksisysteemiä [24]. Staattorin kyllästys parantaa staattorin sähköisiä, termisiä ja mekaanisia ominaisuuksia. Kyllästys tuo ominaisuuksia ja epoksin roolia induktiomootoreiden valmistuksessa käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.3 ja tyhjiökyllästysmenetelmää käsitellään alaluvussa 3.4.

Roottorin ja staattorin lisäksi induktiomootoreissa on erilaisia passiivisia osia moottorin tarkemmasta tyypistä ja käyttötarkoituksesta riippuen. Tärkeimmät passiiviset osat ovat moottorin runko, laakerit, tuuletin sekä akseli. Induktio-mootoreiden runko tehdään tyypillisesti valuraudasta valamalla ja koneistamalla. Rungon (kuva 6, cast-iron frame, end bell, fan cover) tehtävänä on tukea staattorin ydintä ja suojata moottorin komponentteja esimerkiksi vedeltä, kosteudelta, hiekalta ja pölyltä. Rungon pinnassa on yleensä siivekkeet lämmönsiirron tehostamiseksi. Useimmissa sovelluksissa staattorikäänitys tuottaa suurimman osan moottorin lämmöstä. Moottoria voidaan jäähdyttää aktiivisesti tai passiivisesti. Aktiivisessa jäähdytyksessä hyödynnetään esimerkiksi tuulettimia (kuva 6, cooling fan), passiivinen jäähdytys puolestaan perustuu



lämmön siirtymiseen johtumalla ensin moottorin runkoon ja siitä ympäristöön säteilemällä ja luonnollisella konvektiolla. Laakereiden (kuva 6, ball bearing) tehtävänä on pitää roottori paikoillaan niin, että sen ja staattorin väliin jää kaikissa suunnissa ilmarako, ja roottori sijaitsee keskellä staattoria. Laakerit myös vähentävät kitkaa ja kulumista liikkuvien ja liikkumattomien osien välillä. Moottorin akselin tehtävänä on välittää moottorin tuottama mekaaninen energia. Lisäksi moottorissa on lähes aina arvokilpi (kuva 6, nameplate), erilaisia tukirakenteita siirtämistä ja asennusta varten (kuva 6, lifting eye) sekä liitäntäkotelo (kuva 6, wiring box) moottorin asentamista varten. [21]

### 3.2 Induktiomoottoreiden staattorien eristysysteemi

Induktiomoottorin toimintaperiaate edellyttää oikosulun syntymistä roottoriin, jonka johdosta induktiomoottoreiden roottoreita kutsutaan oikosulkuroottoreiksi. Missä tahansa muussa induktiomoottorin osassa oikosulku on moottorille vikatila, joka voi helposti vaurioittaa konetta pysyvästi. Oikosulut estetään käyttämällä eristystä. Vaurioitunut tai viallinen eristys voi vahingoittaa staattorikäämitystä, ja käämityksen vaurioituminen johtaa sähkömoottorin pysyvään vikaantumiseen. Kaikki sähköä johtavat osat, joiden välillä voi olla sähköinen potentiaaliero, tulee eristää toisistaan. Potentiaaliero voi muodostua käämin muodostavien vyyhtien välille, eri vaiheiden käämien välille, tai käämien ja staattorin ytimen välille. Eristys voidaan tehdä useilla erilaisilla tavoilla. Matalajännitteisten sähkömoottoreiden staattorien eristykseen voidaan käyttää esimerkiksi pelkkää kestopuuvaa, mutta suurjännitteisten sähkömoottoreiden käämityksen eristyksessä tarvitaan usein muitakin eristemateriaaleja kestopuuvaa lisäksi. Induktiomoottoreiden staattorikäämityksen eristämiseen käytetään kestopuuvaa lisäksi esimerkiksi eristeteippiä ja muita erilaisia eristemateriaaleja. [21, s. 232-233]

Vyyhti on käämityksen perusosa. Vyyhti valmistetaan käämilangasta (johdinmateriaalista) ja tarpeen mukaan yhdestä tai useammasta eristysmateriaalista. Vyyhti asennetaan niin, että se täyttää kaksi staattorin uraa joko osittain tai kokonaan. [19] Moottorin tyypistä riippuen staattorissa käytetään erilaisia käämityksiä ja eristysysteemejä. Suurjännitteisissä induktiomoottoreissa käytetään usein muotovyyhtikäämitystä. Muotovyyhtikäämityksessä vyyhdet valmistetaan, muotoillaan ja eristetään ennen niiden asennusta staattorin uriin. Yksittäinen vyyhti valmistetaan ensin kiertämällä käämilankaa silmukaksi, yleensä useita kierroksia. Tämän jälkeen muodostettu vyyhti eristetään tarpeen mukaan erilaisilla eristysmateriaaleilla. Viimeiseksi ennen asentamista vyyhti pakotetaan lopulliseen muotoonsa tarkoitukseen suunnitellun koneen avulla. [15, s. 12-13] Kuvassa 8 on asennusvalmiita vyyhtejä.

Oikeassa reunassa näkyy vyyhdin kuparisen käämilangan päät, jotka kytketään staattorin käämityksen muodostamiseksi. Vyyhden valkoiset ja punaiset osat ovat erilaisia eristysmateriaaleja. Myös musta osuus on osa vyyhden eristystä. Mustaa osuutta kutsutaan uraeristykseksi, sillä mustan osan peittämä vyyhden sivu on yhdessä staattorin urassa oleva osa vyyhdestä. [19]

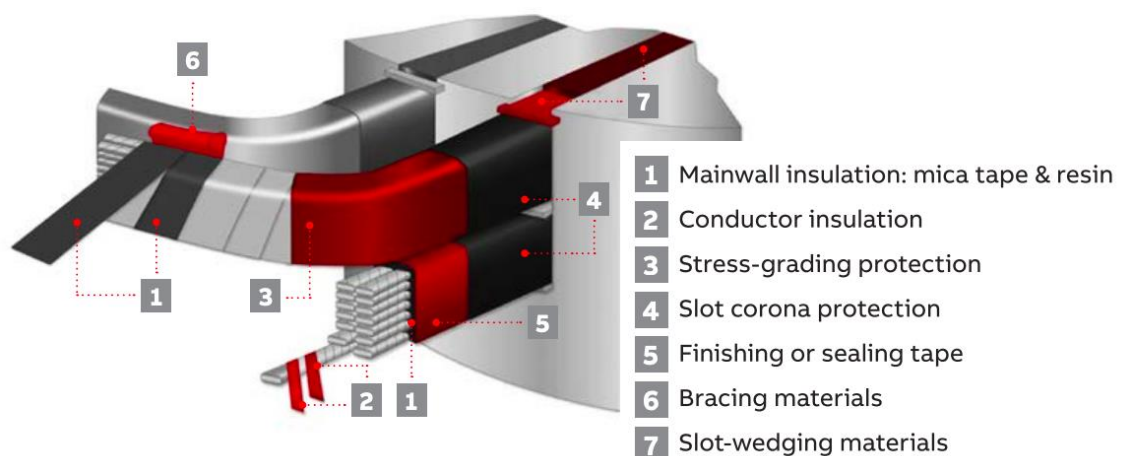


**Kuva 8.** Valmiita vyyhtejä ennen asennusta staattorin uriin [26].

Tärkein ja laajimmin käytetty eristysmateriaali suurjännitemoottoreissa on teippimäinen materiaali yhdessä epoksin kanssa. Teippimäisen eristeen sähköä eristävä materiaali on kiille (engl. mica). Erilaiset kiilteet ovat ryhmä silikaattimineraaleja, joilla on samankaltaiset fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Sähkötekniikan kannalta tärkein kiillelaji on muskoviitti. Muskoviitti soveltuu erinomaisesti suurten sähkömoottoreiden valmistukseen. Sen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat hyvin korkea dielektrinen lujuus (60-70 kV/mm), hyvin pieni lämpölaajenemiskerroin ( $90 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$ ) sekä riittävän korkea kalsinointilämpötila (550-650 °C). Kalsinointilämpötilassa muskoviitin kiderakenne alkaa hajota ja siihen sitoutunut kidevesi pääsee irtomaan. Samalla muskoviitti menettää dielektriivisyytensä, eikä toimi enää sähköeristeenä. Muskoviitin käsittely sellaisenaan on hankalaa, ja siksi staattorikäämityksen valmistamisessa muskoviitti on teippimäisessä muodossa. Teippi koostuu jauhemaisesta muskoviitista,

tukimateriaalista sekä sideaineesta, joka kiinnittää muskoviitin tukimateriaaliin. [27] Tukimateriaalina käytetään tyypillisesti lasikuitukangasta tai polyesterikalvoa, joiden vetolujuuden ansiosta teippaaminen voidaan tehdä koneellisesti. Sideaineena käytetään usein epoksi- tai polyesteriliimaa. [15, s. 98-99]

Kuvassa 9 on esitetty staattorin uraan asennettu vyyhti eristysmateriaaleineen. Etenkin suurissa moottoreissa ja generaattoreissa yhdessä urassa on tyypillisesti kaksi vyyhtiä, kuten kuvassa 9. Vyyhdin pääeristys (kuva 9, 1) koostuu kiilleteipistä sekä epoksista. Epoksi lisätään eristysysteemiin vyyhtien asennuksen jälkeen tyhjiökyllästysmenetelmällä, joka esitellään alaluvussa 3.4. Johdineristys (kuva 9, 2) eristää kupariset käämilangat toisistaan, ja siihen käytetään myös useimmin kiilleteippiä. [28] Johdineristykseen kohdistuu staattorin suurimmat lämpötilat ja se voi helposti vaurioitua vyyhdenvalmistuksen aikana, joten johdineristyksellä on oltava hyvät termiset ja mekaaniset ominaisuudet [15, s. 16-17]. Vyyhden otsassa, eli uran ulkopuolella olevassa vyyhden osassa käytetään materiaaleja, jotka vähentävät sähköisen potentiaalin alueellisia eroja (kuva 9, 3). Tässä eristysteipissä käytetään piikarbidia puolijohteena, jonka käytöllä minimoidaan läpilyönnin mahdollisuus. [29] Urassa olevassa vyyhden osassa, eli vyyhden sivussa, käytetään uraeristystä (kuva 9, 4). Ura suljetaan urakiilalla (kuva 9, 7). Vyyhtien väleissä käytetään tukimateriaaleja (kuva 9, 6), kuten lasikuitunauhaa, jotka vähentävät vyyhtien liikkumista toistensa suhteen moottorin käytön aikana. Tiivisteteippiä (kuva 9, 5) käytetään uloimpana eristekerroksena erityisesti tuomaan mekaanista lujuutta ja suojaamaan vyyhtien pintaa asennusvaiheessa. [19] [28]



**Kuva 9.** Vyyhti asennettuna staattorin uraan [28].

### 3.3 Epoksi induktiomootoreiden eristysmateriaalina

Staattorin yhdistävänä eristyskerroksena on epoksisysteemi, joka koostuu aiemmin esitellystä epoksihartsista DGEBA:sta sekä koveteaineena käytetystä MHHPA:sta. Yhdessä edellä esiteltyjen komponenttien kanssa nämä muodostavat staattorin eristyssysteemin. Epoksi lisätään kokoonpantuun staattoriin tyhjiökyllästysmenetelmällä, jossa se pääsee tunkeutumaan myös eristeteippien alle ja sisään niiden huokoisuuden ansiosta ja muodostamaan yhtenäisen ja tiiviin eristekerroksen. Eristysmateriaalien, ja niiden kautta sähkömoottorin, käyttöikä riippuu termisistä, sähköisistä sekä mekaanisista tekijöistä. Lisäksi käyttöikään vaikuttavat useat erilaiset ympäristötekijät. Eristyssysteemin vanhenemisen ja vikaantumisen kannalta termiset ja sähköiset rasitukset ovat merkittävimpiä. [21, s. 31]

Epoksin tärkein tehtävä on toimia sähköisenä eristeenä ja estää oikosulku staattorin eri komponenttien välillä. Toinen tärkeä tehtävä on minimoida osittaispurkausten syntymisen todennäköisyys. Osittaispurkaukset syntyvät, kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristyksen sähkölujuuden. Osittaispurkaus on pieni sähköpurkaus, joka ei aiheuta oikosulkuja elektrodeina toimivien eristyksen osien välille. Osittaispurkauksia voi syntyä niin eristeen sisällä kuin rajapinnoillakin. Osittaispurkaukset syntyvät tyypillisimmin epoksin epäjatkuvuuskohtiin, kuten esimerkiksi erilaisiin huokosiin ja onteloihin, tai epoksin ja vierashiukkasen tai toisen eristemateriaalin väliselle rajapinnalle. Yksittäiset osittaispurkaukset ovat pieniä, mutta ne voivat vaikuttaa eristyksen elinikään pitkällä aikavälillä. Osittaispurkaus tuottaa lämpöä sekä erilaisia kaasuja ja happamia aineita, jotka voivat syövyttää eristysmateriaaleja. Sekä kiille että epoksi kestävät hyvin suuriakin osittaispurkauksia moniin muihin materiaaleihin verrattuna, mikä selittää niiden ylivoimaista suosiota etenkin suurjännitemootoreiden valmistuksessa. [30, s. 76]

Käämilangoissa syntyy lämpöä johdinmateriaalin resistiivisyyden johdosta. Epoksin yksi tehtävä on johtaa käämilangoissa syntynyt lämpö mahdollisimman tehokkaasti staattorin pinnalle, josta se voi poistua. Eristysmateriaalina käytettävän muovin yksi keskeisimmistä vaatimuksista onkin riittävä lämmönjohtavuus. Moottorin korkein mahdollinen käyttölämpötila riippuu sen eristyssysteemistä, ja erityisesti siinä käytetyistä muoveista. Termiset jännitteet ovat merkittävän eristyksen asteittaisen vaurioitumisen aiheuttaja ilmajäähdytteisissä moottoreissa. Kun moottorin lämpötila pysyy suunnitelluissa rajoissa käytön aikana, termistä vanhenemista ei tapahdu. Käyttölämpötilaa korkeammissa lämpötiloissa tapahtuu hapettumista, mikä haurastuttaa epoksia. Hapettuminen voi myös saada aikaan eristysmateriaalien irtaantumisen toisistaan, mikä heikentää käämityksen mekaanista lujuutta ja voi helpottaa osittaispurkausten syntymistä. Leikkausjännityksiä voi syntyä käämityksessä erityisesti

käämilangan ja sitä ympäröivän johdineristyksen välille lämpötilan muuttuessa. Moottorin lämpötilassa tapahtuu muutoksia, kun se käynnistetään tai kun sen kuormitus vaihtelee. Leikkausjännitysten syntyminen johtuu kuparisen käämilangan ja epoksisysteemin toisistaan poikkeavista lämpölaajenemiskertoimista. Syklinen terminen kuormitus voi saada eristyksen ja kuparin irtoamaan toisistaan ja aiheuttaa vikatilaa. [15, s. 49-50]

Epoksin tehtävänä on myös sitoa käämit ja niiden useat eristyskomponentit yhdeksi mekaanisesti kestäväksi kokonaisuudeksi. Staattorin käämitykseen kohdistuu mekaanisia voimia muuttuvien magneetti- ja sähkökenttien johdosta. Staattorin urissa epoksi täyttää vyyhden, uran ja eristemateriaalien väliset tyhjät tilat niin, ettei vyyhti pääse liikkumaan urassa. Mikäli vyyhti pääsee moottorin käytön aikana liikkumaan uraansa, eri osien hankautuminen toisiinsa voi helposti aiheuttaa joko eristyksen rikkoutumisen joko hankautumalla tai väsymismurtumalla. Kumpikin voi johtaa oikosulkuun ja moottorin pysyvään vikaantumiseen. Moottorin käytöstä aiheutuvat värähtelyt ovat erityisen haitallisia uran ulkopuolella olevalle osalle käämitystä, sillä värähtely voi aiheuttaa väsymismurtumia. Vyyhtien uran ulkopuolinen osuus tuetaan käyttämällä esimerkiksi eristettyä metallirengasta, joka kiinnitetään jokaiseen vyyhtiin. Toinen tavallinen tapa on käyttää tukimateriaalina lasikuitunauhaa tai -köyttä. Kuvassa 10 on valmis staattorin käämitys, jossa on käytetty lasikuitunauhaa tukemaan vyyhtejä ja estämään niiden keskinäistä liikettä. Tyhjiökyllästyksessä lasikuitunauha kyllästyy epoksilla ja kovetuksen jälkeen muodostaa mekaanisesti lujan tukirakenteen. [15, s. 30-34]



**Kuva 10.** Staattorin valmis käämitys ennen epoksia [31].

Usein eristyksen vaurioitumiseen tarvitaan useampi kuin yksi tekijä. Ympäristötekijät eivät yleensä yksin riitä vaurioittamaan eristystä tai muita moottorin osia, mutta yhdessä esimerkiksi korkean lämpötilan kanssa ne voivat nopeuttaa vaurioitumista. Ympäristötekijöitä voivat olla esimerkiksi ilmankosteus, joka voi tiivistyä käämitykseen tai käyttöympäristöstä moottoriin pääsevät vieraspartikkelit, kuten esimerkiksi hiekka tai pöly. Myös erilaiset kemikaalit ovat mahdollisia eristystä vaurioittavia ympäristötekijöitä. Kemikaaleja voi päätyä eristykseen esimerkiksi siitä prosessista, missä moottoria käytetään. Myös erilaiset abrasiivit voivat vaurioittaa eristystä. [15, s. 52-53]

### 3.4 Tyhjiökyllästysmenetelmä

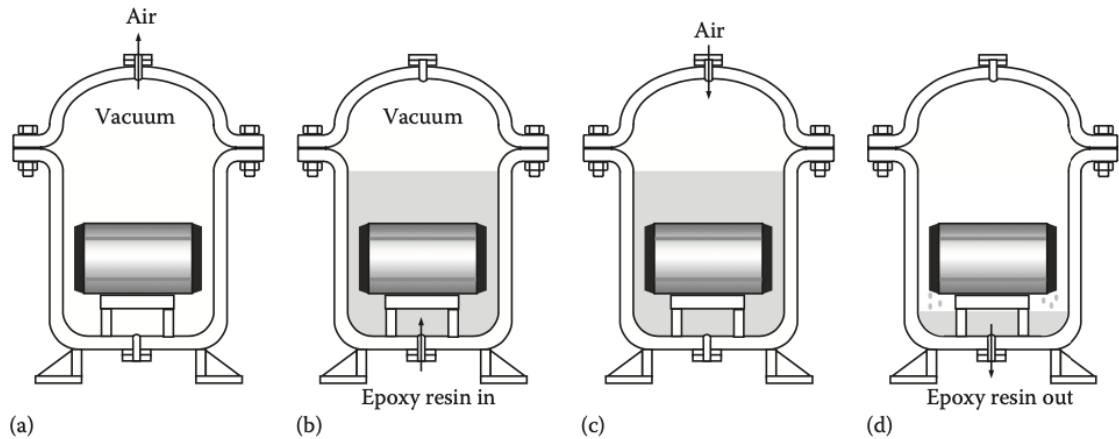
Staattorin valmistuksen viimeinen vaihe ennen moottorin kokoonpanoa on kyllästys. Kyllästyksessä staattori ja sen käämitys kyllästetään epoksilla ja sen jälkeen kovetetaan. Kyllästyksellä parannetaan staattorin sähköeristystä, käämityksen mekaanista lujuutta, lämmönsiirtoa pois johtimista, sekä suojataan staattoria ja käämitystä käyttöympäristön olosuhteilta. Sähkömoottorin ja staattorin tyypistä riippuen käytetään joko uppokyllästys-, valutuskyllästys- tai tyhjiökyllästysmenetelmää. [21, s. 249-253]



Tyhjiökyllästysmenetelmä (vacuum pressure impregnation, VPI) on näistä ylivoimaisesti käytetyin [28]. Tyhjiökyllästysmenetelmällä voidaan erityistapauksissa kyllästä yksittäisiä vyyhtejä ennen niiden asennusta staattoriin, mutta tavallisempaa on kyllästä koko staattori sen jälkeen, kun vyyhdet on asennettu paikoilleen ja käämityksen kytkennät on tehty. [15, s. 105]

Tyhjiökyllästysmenetelmässä kyllästysaineena käytetään joko polyesteri- tai epoksisysteemiä, joilla on matala viskositeetti. Polyesteri on halvempaa ja helpommin käsiteltävää valmistusvaiheessa, mutta epoksin lujuuden ja termisten ominaisuuksien ansiosta se on käytetympi etenkin suurjännitemoottoreiden valmistuksessa. [15, s. 106] Epoksihartsin lisäksi epoksissa on kovetetta, useimmin MHPA:ta. Liuotteita ei käytetä, sillä korotetuissa lämpötiloissa tehtävässä epoksin kovetusvaiheessa liuotteet haihtuvat, jättäen muovin rakenteen huokoiseksi. Huokoinen rakenne ei kykene eristämään sähköä tai estämään osittaispurkausten syntymistä. [21, s. 252-253]

Kuvassa 11 on esitetty tyhjiökyllästysmenetelmän vaiheet. Tyhjiökyllästys tehdään menetelmään suunnitellussa säiliössä. Ensimmäisessä vaiheessa (kuva 11, a) kokoonpantu staattori asetetaan säiliöön ja säiliöön muodostetaan tyhjiö. Tyhjiön avulla staattorista ja käämeistä poistetaan kosteus ja ilma. Toisessa vaiheessa (kuva 11, b) säiliöön päästetään nestemäisessä muodossa olevat epoksihartsit ja kovete niin, että staattori peittyy täysin. Usein epoksihartsit ja kovete lämmitetään ennen tätä vaihetta erillisessä säiliössä. Tyhjiötä pidetään yllä jonkin aikaa ja annetaan epoksisysteemin levitä staattorin osiin. Kolmannessa vaiheessa (kuva 11, c) tyhjiö puretaan ja säiliöön muodostetaan ylipaine. Ylipaineen avulla nestemäinen epoksi saadaan tunkeutumaan staattorin eristyssysteemin pienempiinkin huokosiin. Neljännessä vaiheessa (kuva 11, d) ylimääräinen epoksi poistetaan säiliöstä ja ylipaine puretaan. Tämän jälkeen epoksi kovetetaan erillisessä uunissa. Uuni ohjelmoidaan suorittamaan tietty lämpökäsittely, jossa lämpötilat vaihtelevat ennalta määrättyjen syklien mukaan. Tällä minimoidaan lämpöshokin mahdollisuus. [21, s. 250-253]



**Kuva 11.** Tyhjiökyllästysmenetelmän vaiheet [21, s. 251].

### 3.5 Anhydridikovetteisten epoksien vaihtoehdot sähkömoottoreiden valmistuksessa

Vaikka DGEBA:ta ja muita epoksihartseja voidaan kovettaa kertamuoveiksi homopolymerisaatiolla, ne olisivat liian hauraita sähkömoottoreissa käytettäväksi. Tästä syystä DGEBA:n kanssa käytetään ristosilloituskovetteita, jotka muodostavat kopolymeerirakenteen hartsin kanssa. Ristosilloituskovetteista suosituimpia ovat erilaiset amiinit. Ne ovat pääsääntöisesti anhydridipohjaisia kovetteita haitallisempia ihmisille, minkä johdosta niiden käsittely sähkömoottoreiden valmistuksessa olisi haastavaa. Toisaalta suurin osa amiineista ei sovellu käytettäväksi niin korkeisiin lämpötiloihin, mitä sähkömoottorit normaalikäytössään tuottavat. Tästä syystä amiinipohjaiset ristosilloituskovetteet eivät ole vaihtoehto DGEBA:n kovetukseen sähkömoottoreiden valmistuksessa. Muista saatavilla olevista kovetteista esimerkiksi merkaptaanit eivät myöskään sovellu käytettäväksi sähkömoottoreissa vaadittavalla lämpötila-alueella. Tietyt kovetteet, kuten novolakat, eivät sovellu käytettäväksi tyhjiökyllästysmenetelmässä. Esimerkiksi isosyanaatti ja karboksyyliiryhmiä sisältävät polyesterit puolestaan ovat herkkiä kosteudelle ja kemikaaleille, joten ne eivät sovellu sähkömoottoreissa käytettäväksi. [6]

Happoanhydridikovetteiden käyttöön ilman asianmukaista suojavarustusta liittyy terveysriskejä. Happoanhydridit ärsyttävät ihoa, silmiä ja hengitysteitä. Matalakin altistumistaso voi aiheuttaa allergista ihottumaa, allergista nuhaa ja astmaa. [32] Erityisesti hengitysteitä herkistävien ominaisuuksien takia Euroopan kemikaalivirasto (engl. European Chemicals Agency, ECHA) on lisännyt MHHPA:n erityistä huolta aiheuttavien aineiden listalle [33]. Lista sisältää aineita, jotka on luokiteltu vakavalla ja peruuttamattomalla tavalla ihmisten terveydelle tai ympäristölle haitallisiksi. Erityistä



huolta aiheuttavien aineiden listalta aineet voidaan siirtää luvanvaraisten aineiden luetteloon. Mikäli aine luokitellaan luvanvaraiseksi, sitä ei voi myydä tai käyttää EU-alueella ilman erityistä lupaa [34]. Vaikka MHHPA ei vielä ole luvanvarainen, MHHPA:ta valmistavien ja käyttävien yritysten tulee varautua sen mahdolliseen käyttökieltoon ja luvanvaraisuuteen. Mahdollisia skenaarioita käyttökiellon toteutuessa on tutkittu eurooppalaisissa MHHPA:ta käyttävissä yrityksissä. Vaihtoehtoina mainittiin esimerkiksi vaihtoehtoinen valmistusprosessi, MHHPA:n korvaaminen toisella aineella, toiminnan lopettaminen sekä toiminnan siirtäminen Euroopan ulkopuolelle. Esimerkiksi Yhdysvalloissa tai Kiinassa MHHPA:n käyttöä ei rajoiteta. [35]

Tämän opinnäytetyön näkökulmasta tarkastellaan ainoastaan vaihtoehtoja MHHPA:n käytölle. Mikäli MHHPA:n käytöstä tulee luvanvaraista, yritykset eivät voi laskea toimintaansa sen varaan, että luvan saisi tulevaisuudessa. Tästä syystä Euroopassa toimintaansa jatkavien yritysten tulee etsiä MHHPA:lle korvaavia vaihtoehtoja, mielellään niin, että valmistusprosessia ei tarvitse muuttaa. Valmistusprosessin muuttaminen tai tuotannon siirtäminen Euroopan ulkopuolelle vaatisi yrityksiltä suuria investointeja esimerkiksi tyhjiökylästykseseen liittyvän laitteiston ja tuotekehityksen osalta. Muut happoanhydritit eivät ole vaihtoehto MHHPA:n korvaajiksi, sillä nekin ärsyttävät hengitysteitä, ja on mahdollista, että tulevaisuudessa niidenkin käyttö tulee olemaan luvanvaraista [27].

Potentiaalisia vaihtoehtoja anhydridikovetteille on kartoitettu jonkin verran. Korvaavia vaihtoehtoja etsitään etenkin anhydridikovetteita valmistavissa ja käyttävissä yrityksissä sekä yritysten yhteisissä kehitysprojekteissa, joten tietoa on toistaiseksi saatavilla varsin rajallisesti. Muutamia yritysten kehittämiä ratkaisuja on esitelty alan konferensseissa. Tarkkoja tietoja esimerkiksi korvaavien epoksien tarkasta koostumuksesta ei ole saatavilla. Jufeng Company (Kiina) on kehittänyt korvaavan ratkaisun, jossa käytetään epoksisysteemiä, jonka kovettamiseen ei tarvita happoanhydridejä [36]. Huntsman (Sveitsi) ja Isovolta (Itävalta) ovat kehittäneet yhteisprojektissa epoksisysteemin, jonka kovettuminen perustuu epoksihartsin katalysoituun polymerisaatioon [27].

Huntsmanin ja Isovoltan yhteisessä kehitysprojektissa lähtökohtana oli kehittää kiilleteippiä ja epoksisysteemiä yhtenä kokonaisuutena, joka ei sisällä MHHPA:ta tai muitakaan happoanhydridejä. Puhdas DGEBA voi kiteytyä kovettuessaan, eikä silloin enää vastaisi sähkömoottoreissa käytettävien eristemateriaalien vaatimuksiin lujuuden osalta. Tästä syystä puhdas DGEBA ei ole vaihtoehto. Potentiaalisia uusia epoksisysteemejä kehitettiin kolme. Uudet epoksisysteemit on esitelty taulukossa 1. LME 11173 on useasta erilaisesta monomeerista koostuva hartsi. Kovettimena voidaan käyttää katalyyttejä, jotka ottavat monomeereilta vastaan elektroniparin, helpottaen

monomeerien välistä polymerisaatiota. DY ja EP ovat tällaisia katalyyttejä. Kolmannessa vaihtoehtoisessa epoksisysteemissä käytetään epoksihartsia LME 11096-1, joka sisältää yhtä monomeeriä. Sen homopolymerisaatiota katalysoidaan katalyytillä MA, jonka toiminta perustuu hapetus-pelkistysreaktioihin. [27]

**Taulukko 1.** *Huntsmanin kehittämät uudet epoksisysteemit. [27]*

Epoksisysteemi	Käytettävä hartsi	Katalyytti ja reaktio
New 1	Epoksihartsi määrittelemätön	LME 11173, DY, polymerisaatio
New 2	Epoksihartsi määrittelemätön	LME 11173, EP, polymerisaatio
New 3	Epoksihartsi LME 11096-1, ei sisällä DGEBA:ta	MA, homopolymerisaatio

Taulukossa 2 on esitelty sekä referenssiepoksisysteemin että uusien epoksisysteemien ominaisuuksia. Referenssiepoksisysteemi on DGEBA- ja happoanhydridipohjainen epoksi, jonka kovetuksessa on käytetty katalyyttinä sinkkinaftenaattia. Testauksessa New 1:llä ja New 2:lla oli korkeampi viskositeetti kuin referenssinäytteellä. Riittävän matala viskositeetti on oleellinen ominaisuus tyhjiökyllästysmenetelmän kannalta. Kaikkien kehitettyjen uusien systeemien viskositeetti on kuitenkin riittävän matala, jotta ne soveltuvat tyhjiökyllästysmenetelmään. New 3 -systeemillä oli muita korkeampi lasisiirtymälämpötila. Epoksin kovettamiseen vaadittava lämpökäsittely oli kaikissa uusissa systeemeissä referenssisysteemiin verrattuna kestoaltaan lyhyempi. Lämpökäsittelyn lyheneminen nopeuttaa prosessin läpimenoaika ja on toivottava ominaisuus. Kaikkien näytteiden vetolujuus ja murtovenymä olivat lähellä toisiaan. Uusissa systeemeissä kovettumiseen liittyvä kutistuma on hieman suurempi referenssisysteemiin verrattuna. New 3 -systeemi on muita hieman hauraampi. [27] Kaikki sähköeristeet johtavat jonkin verran sähköä. Tätä eristeiden tehohäviötä kutsutaan dielektriseksi häviöiksi. [30, s. 51] Eristemateriaalin dielektrisiä häviöitä kuvataan häviökertoimella  $\tan\delta$ . Eristyksen vaurioituminen nostaa häviökerrointa ja sitä voidaan jossain määrin käyttää eristyksen kunnon seurantaan. [15, s. 344-345] Kaikki uudet eristemateriaalit pystyivät alittamaan referenssisysteemin häviökertoimen, joten eristävyys puolesta ne ovat käyttökelpoisia vaihtoehtoja. [27]

**Taulukko 2.** *Uusien epoksisysteemien keskeisiä ominaisuuksia. [27]*

Ominaisuus		Referenssi	New 1	New 2	New 3
Viskositeetti (60 °C)	mPas	31,0	100,3	100,3	46,4
Lasiirtymälämpötila, $T_g$	°C	144	153 / 154	140 / 142	173 / 194
Lämpökäsittely (näytteelle)	h, °C	16 h, 90 °C + 10 h 140 °C	4 h 100 °C + 10 h 170 °C	4 h 125 °C + 12 h 170 °C	2 h 90 °C + 2 h 130 °C + 10 h 180 °C
Vetolujuus	MPa	45	43	49	36
Murtovenymä	%	1,75	1,8	2,5	1,2
Häviökerroin, $\tan\delta$	%	8,0	4,7	2,7	5,8

Epoksisysteemejä testattiin yhdessä uusien kiilleteippien kanssa. Uusissa teipeissä kyllästyksessä käytettävä katalyytti on integroitu teippiin. Tällöin tyhjiökyllästyksessä vain teipin kanssa kosketuksiin pääsevä hartsi reagoi ja kovettuu. Kehitetyistä systeemeistä New 1 vastaa ominaisuuksiltaan kaikkein tarkimmin referenssisysteemiä, ja on kokonaiskustannuksiltaan halvin uusista systeemeistä. New 2:n etu muihin verrattuna on korkeampi vetolujuus ja suurempi murtovenymä. New 3:n etuna on erityisesti matala viskositeetti ja lyhyt kovetusaika, ja se on muita systeemejä jäykempi, mutta myös kallein vaihtoehto. Tehdyn selvityksen perusteella kehitetyistä systeemeistä New 1 ja New 2 soveltuisivat korvaamaan anhydridikovetteiset epoksit sähkömoottoreiden valmistuksessa, koska niillä saavutetaan vaadittavat ominaisuudet sekä valmistusprosessissa että osana sähkömoottoria. Mitään systeemeistä ei kuitenkaan ole vielä testattu sähkömoottoreiden valmistuksessa, joten lisää tutkimusta vaaditaan sähkömoottorivalmistajien kanssa ennen uusien vaihtoehtojen käyttöönottoa. [27]

Jufeng Companyn kehittämässä anhydridivapaassa epoksisysteemissä kovetukseen käytetään katalyyttistä kovetetta. Käytettävä epoksihartsi on erilaisten bisfenoli A- ja F-pohjaisten epoksihartsien monomeerien seos. Epoksihartsiseoksen viskositeetti on suhteellisen korkea, joten systeemissä käytetään reaktiivista ohennetta. Ohenne laskee hartsin viskositeettia ja reagoi epoksisysteemin kovettuessa muiden komponenttien kanssa jääden osaksi epoksin rakennetta. Epoksisysteemissä käytetään katalyyttistä

kovetetta sekä lisäaineita, joita ei julkaisussa tarkemmin eritellä. Taulukossa 3 on esitetty kehitetyn epoksisysteemin ja referenssisysteemin keskeisiä ominaisuuksia. Referenssisysteeminä käytettiin anhydridikovetteista epoksihartsia. [36]

**Taulukko 3.** *Jufeng Companyn epoksisysteemin keskeisiä ominaisuuksia. [36]*

Ominaisuus		Testiolosuhteet	Referenssi	Testisysteemi
Viskositeetti	mPas	25°C ± 1°C	360,4	226
Lasiirtymälämpötila, T <sub>g</sub>	°C	-	148	98
Häviökerroin, tanδ	%	155°C ± 2°C	1,86	1,63

Jufeng Companyn kehittämän epoksisysteemin lasiirtymälämpötila on referenssisysteemiin verrattuna huomattavasti alhaisempi, ja hyvin luultavasti muodostuisi ongelmaksi suurjännitemoottoreiden normaaleissakin käyttöolosuhteissa. Konferenssijulkaisun mukaan [36] Jufeng Companyn systeemiä ei myöskään testattu eristesysteemin muiden materiaalien kanssa, joten lisätutkimus on edellytys ennen kuin voidaan tehdä johtopäätöksiä kehitetyn systeemin mahdollisuuksista korvata anhydridikovetteisia epokseja.

## 4. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin anhydridikovetteisten epoksien roolia sähkömoottoreiden valmistuksessa sekä mitä vaihtoehtoja anhydridikovetteisille epoksille on. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuskysymysten tulokset ja johtopäätökset esitellään seuraavaksi.

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen tavoitteena oli selvittää, miksi anhydridikovetteisia epoksia käytetään sähkömoottoreiden valmistuksessa. Anhydridikovetteista epoksia käytetään sähkömoottoreiden valmistuksessa, koska sillä saavutetaan staattorin eristysyhteiselle välttämätön sähköinen eristävyys, riittävä lämmönjohtavuus, riittävä mekaaninen lujuus sekä suojat ympäristötekijöitä, kuten kosteutta ja kemikaaleja, vastaan. Anhydridikovetteiset epokset soveltuvat hyvin käytettäväksi tyhjiökyllästysmenetelmässä. Yhdessä kontrolloidun kovetusprosessin kanssa anhydridipohjaiset kovetteet saavat aikaan halutun ristosilloitetun rakenteen, ja sitä kautta vaaditut ominaisuudet. Muut saatavilla olevat ristosilloituskovetteet eivät yksin pysty tuottamaan epoksille vastaavia ominaisuuksia.

Toisen tutkimuskysymyksen tavoitteena oli selvittää, mitä vaihtoehtoja anhydridikovetteisille epoksille on. Anhydridikovetteisille epoksille etsitään vaihtoehtoja, sillä niiden käyttöä Euroopassa ollaan tulevaisuudessa rajoittamassa. Vaihtoehtojen etsiminen on vielä tutkimusasteella, ja tutkimusta tehdään etenkin epoksin komponentteja ja muita eristysmateriaaleja valmistavissa yrityksissä. Tällä hetkellä tutkitut vaihtoehdot keskittyvät anhydridikovetteen korvaamiseen, epoksihartsin pysyessä ennallaan tai hyvin samankaltaisena. Pelkän kovetteen vaihtaminen voi mahdollistaa esimerkiksi tyhjiökyllästyslaitteiston käytön jatkamisen ilman uusia laiteinvestointeja.

Esitellyt vaihtoehdot perustuivat joko katalysoituun epoksihartsin homopolymerisaatioon tai anhydridivapaan kovetteen ja epoksihartsin kopolymerisaatioon. Esiteltujen tulosten perusteella homopolymerisaatioon perustuvat vaihtoehdot eivät saavuta yhtä hyvin vaadittuja ominaisuuksia kuin kopolymerisaatioon perustuvat vaihtoehdot. Toisaalta kopolymerisaatioon perustuvissa vaihtoehdoissa epoksisysteemin komponenttien kokonaismäärä kasvaa. Epoksin komponenttien määrän kasvaessa epoksin hinta voi nousta. Jokainen epoksiin lisätty komponentti vaikuttaa epoksin lopullisiin ominaisuuksiin. Uudet komponentit vaikuttavat esimerkiksi epoksin stoikiometriaan ja ristosilloittumisreaktioihin, ja sitä kautta lopulliseen rakenteeseen. Monen komponentin

systeemit voivat myös lisätä valmistusvaiheita ja hankaloittaa kovetusprosessin kontrollointia. Komponenttien määrästä riippumatta, epoksin koostumuksen pienetkin muutokset vaativat aina käytännön kokemusta epoksisysteemin käyttäytymisestä kyseisessä valmistusprosessissa.

Vaihtoehtoja vertailtaessa on huomioitava paitsi uuden materiaalin ominaisuudet, myös uuden materiaalin aiheuttamat muutokset muihin toimintoihin. Uuden materiaalin käyttö voi vaikuttaa käytettäviin valmistusmenetelmiin ja valmistuksen vaiheisiin. Muutokset valmistuksessa vaikuttavat myös tuotteen suunnitteluun. Valmistusmenetelmän tai -vaiheiden muuttuminen voi tuoda työympäristöön uusia riskejä, jotka voivat vaikuttaa työntekijöiden työturvallisuuteen. Uusilta riskeiltä suojautuminen voi vaatia esimerkiksi uusien suojavarusteiden käyttöönottoa päivitetyn riskienarvioinnin pohjalta. Toisaalta uusi materiaali voi muuttaa sähkömoottorin valmistuksen kustannuksia, ja nostaa valmistuksen välillisiä kustannuksia muutostöiden johdosta.

Esitellyt vaihtoehdot ovat lupaavia, mutta konferenssijulkaisujen mukaan niitä on testattu vasta yksittäisinä näytteinä. Ennen vaihtoehtojen kaupallistamista tarvitaan materiaalin testausta osana staattorin kokonaista eristyssysteemiä, jotta materiaalin toimivuudesta kyseisessä sovelluskohteessa saadaan luotettavaa tietoa. Anhydridikovetteiden käytön rajoittaminen vaikuttaa sekä kyseisiä kovetteita valmistaviin että käyttäviin yrityksiin. Koska asiakassuhde on jo olemassa, erilaiset yhteisprojektit uusien epoksimateriaalien tuotekehityksessä ovat mahdollisesti kannattava vaihtoehto.

## LÄHTEET

- [1] Maalit ja lakat. Termit ja määritelmät, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 4618, Helsinki, 2016, 90 s.
- [2] Muoviteollisuus ry: Muovisanastoa, Saatavissa (viitattu 22.6.2020):  
<https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=8>
- [3] G. Collin, R. Mildenberg, M. Zander, H. Höke, W. McKillip, W. Freitag, W. Imöhl, Resins, Synthetic, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7th edition, Berlin, Wiley-VCH, 2011, pp. 1-26.
- [4] S. Fakirov. 13.7.3 Matrices, Fundamentals of Polymer Science for Engineers, John Wiley & Sons, 2017, pp. 330-332.
- [5] S. H. Goodman, H. Dodiuk, Handbook of Thermoset Plastics, 3rd ed., Burlington, Elsevier Science & Technology Books, 2013, 768 p.
- [6] H. Q. Pham, M. J. Marks, Epoxy Resins, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7th edition, Berlin, Wiley-VCH, 2005, s. 155-244.
- [7] F. Jin, X. Li, S. Park, Synthesis and application of epoxy resins: A review, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Sep 25, 2015, Vol. 29, s. 1-11.
- [8] M. Gilbert, Brydson's Plastics Materials, 8th edition, Elsevier, 2017, 835 p.
- [9] National Library of Medicine: PubChem, Available (accessed 15.6.2020):  
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [10] G. Sienel, R. Rieth, K. T. Rowbottom, Epoxides, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7th edition, Berlin, Wiley-VCH, 2000, s. 139-154.
- [11] J. Seppälä. Polymeeriteknologian perusteet, 5. painos, Helsinki, Otatieto, 2005, 346 s.
- [12] Työterveyslaitos: EPOKSIKANSIO - Kemikaaliturvallisuus rakennuspinnoitustyössä, 2015, Saatavissa (viitattu 28.5.2020):  
<https://www.ttl.fi/tyoymparisto/altisteet/epoksi-turvallinen-pinnoituskemikaalien-kaytto/>
- [13] N. Andraschek, A. J. Wanner, C. Ebner, G. Riess, Mica/Epoxy-Composites in the Electrical Industry: Applications, Composites for Insulation, and Investigations on Failure Mechanisms for Prospective Optimizations, Polymers, 2016, Vol. 8, Iss. 5, pp. 1-23.
- [14] F.Y.C. Boey, W. Qiang, Glass-transition temperature–conversion relationship for an epoxy–hexahydro-4-methylphthalic anhydride system, Journal of Applied Polymer Science, 2000, Vol. 78, Iss. 3, pp. 511-516.
- [15] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, 2nd edition, Somerset, Wiley, 2014.

- [16] PubChem: Methylhexahydrophthalic anhydride, 2005, Available (accessed 12.7.2020): <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methylhexahydrophthalic-anhydride>
- [17] P. Graham, BIOS Instant Notes in Organic Chemistry, 2nd ediditon, Abingdon, CRC Press LLC, 2004.
- [18] L. Hietalahti, Muuntajat ja sähkökoneet, 1. painos, Tampere, Tammertekniikka, 2011, 130 s.
- [19] L. Aura, A. J. Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, Porvoo, WSOY, 1996.
- [20] CENELECin standardijännitteet, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 60038, 2012, 20 s.
- [21] W. Tong, Mechanical design of electric motors, 1st edition, Boca Raton, Florida, CRC Press, 2014, 702 p.
- [22] Electrical Academia: Three Phase Induction Motor Construction, Available (accessed 15.7.2020): <https://electricalacademia.com/induction-motor/three-phase-induction-motor-construction/>
- [23] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, Design of Rotating Electrical Machines, 2nd edition, Somerset, John Wiley & Sons, Incorporated, 2013, 585 p.
- [24] ABB: High voltage general purpose motors - Technical catalog, 2018, Saatavissa (viitattu 20.7.2020): <https://new.abb.com/motors-generators/high-voltage-induction-motors/rib-cooled-motors-hxr>
- [25] Electrical4U: Squirrel Cage Induction Motor: Working Principle & Applications, 2020, Available (accessed 27.7.2020): <https://www.electrical4u.com/squirrel-cage-induction-motor/>
- [26] Partzsch Group: Three-phase diamond coil windings, Available (accessed 25.7.2020): <https://en.partzsch.de/diamond-coils>
- [27] C. Beisele, M. Brasch and E. Kattnig, New MHHPA-free epoxy-based vacuum pressure impregnation systems and new mica-tapes for large generators and motors, 2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON), May 16-18, 2017, EIA, May 2017.
- [28] ABB: Controlling partial discharge in high voltage motors and generators, 2017, Available (accessed 30.7.2020): [https://library.e.abb.com/public/d35ed76b345b4f368192407106435eed/ABB%20whitepaper\\_Partial\\_discharge.pdf](https://library.e.abb.com/public/d35ed76b345b4f368192407106435eed/ABB%20whitepaper_Partial_discharge.pdf), pp. 1-12.
- [29] O. Krpál, P. Mráz, V-A Characteristic Measuring of Stress Grading Tapes in the End-winding of Synchronous Generators, Procedia Engineering, 2014, Vol. 69, pp. 1523-1528.
- [30] M. Aro, K. Nousiainen, Suurjännitetekniikka, 2nd ed., Helsinki, Otatiето, 2003.



[31] Vaananen H., ABB: The EU chemical proposal has many risks, few benefits, 2013, Available (accessed 25.7.2020): <https://www.abb-conversations.com/2013/07/the-eu-chemical-proposal-has-many-risks-few-benefits/>

[32] Työterveyslaitos: Tietokortti kemiallisesta altistumisesta metalli- ja autoalojen työtehtävissä - Käämien hartsikyllästys, Työterveyslaitos, 2018, Saatavissa (viitattu 15.7.2020): [https://ttk.fi/tyoturvallisuus\\_ja\\_tyosuojelu/tyoturvallisuuden\\_perusteet/tyoymparisto/kamat-tietokortit/tehtavakohtaiset\\_kamat-tietokortit](https://ttk.fi/tyoturvallisuus_ja_tyosuojelu/tyoturvallisuuden_perusteet/tyoymparisto/kamat-tietokortit/tehtavakohtaiset_kamat-tietokortit), s. 1-3.

[33] Euroopan Kemikaalivirasto: Ehdokasluettelo erityistä huolta aiheuttavista aineista lupamenettelyä varten, Saatavissa (viitattu 26.7.2020): <https://echa.europa.eu/fi/candidate-list-table>

[34] Euroopan Kemikaalivirasto: Kemikaalit elämässämme – huolta aiheuttavat kemikaalit – SVHC-aineet - News - ECHA, Saatavissa (viitattu 26.7.2020): <https://echa.europa.eu/fi/-/chemicals-in-our-life-chemicals-of-concern-svhc>

[35] Anhydrides Joint Industry Taskforce: AJIT Public Consultation Report, 2016, Available (accessed 27.7.2020): <https://anhydrides.eu/pcr/>

[36] X. Yu, W. Wen, Z. Cheng and G. Shengzhi, Developing a novel environment friendly epoxy solventless impregnating resin without anhydride for high voltage motor, 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), May 14-17, 2017, IEEE, 2017.